

**Análisis del impacto de los instrumentos de política de producto integrada en la fase de fin de vida de las luminarias, caso Bogotá, mediante el uso de modelos matemáticos.**

Diego Germán Toro Santamaría

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Decanatura de Ingeniería Industrial  
Maestría en Ingeniería Industrial  
Bogotá D.C., Colombia  
2015**

**Análisis del impacto de los instrumentos de política de producto integrada en la fase de fin de vida, de las luminarias caso Bogotá, mediante el uso de modelos matemáticos.**

Diego Germán Toro Santamaría

Trabajo de investigación para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Industrial

Director

Sonia Alexandra Jaimes  
MSc. en Ingeniería industrial.

Co-Director

Luz Angélica Rodríguez  
Ph.D. (cadidate) Industrial Ecology and Sustainability

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Decanatura de Ingeniería Industrial  
Maestría en Ingeniería Industrial  
Bogotá D.C., Colombia  
2015**

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2015 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá. Colombia  
TEL: +57 – 1 668 36 00

# Agradecimientos

## Agradecimientos

Quisiera dar un agradecimiento en primer lugar a Dios y a mi familia por su apoyo incondicional en este proceso que pronto termina, especialmente a mi mamá Martha Lucia Santamaría, ya que sin su apoyo, dedicación y esfuerzo todo esto no hubiera sido posible.

En segundo lugar agradecer a los docentes que fueron la guía y la inspiración para continuar por las vías de la investigación, especialmente al Prof. Dr. Ignacio Pérez por su apoyo y constante motivación, adicionalmente a Sonia Jaimes MSc. y a Luz Angélica Rodríguez Phd. (Candidate) por permitirme trabajar a su lado durante estos años como asistente de investigación y ser las directoras de este maravilloso proyecto.

Quiero extender también mis agradecimientos a mis compañeros de maestría, compañeros de trabajo y secretarías, por sus aportes y colaboración, comprensión, paciencia y ánimo brindados.

A todos ellos muchas gracias.

# Resumen

## Resumen

El análisis ciclo de vida de las luminarias en Bogotá propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] permite identificar el comportamiento del sistema en términos de las relaciones presentes en cada fase que lo componen, así mismo las políticas de producto integrado PPI propuestas por el autor contribuyen a la disminución de la cantidad de material llevado 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 políticas propuestas por el autor 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 en el periodo de simulación. Al solucionar el modelo de optimización se evidencia que este tipo de trabajo conjunto, simulación y optimización, pueden lograr buenos escenarios sin olvidar las limitaciones de cada una de las herramientas, como para este caso que se puede lograr 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.

## Abstrac

The bulbs life cycle analysis proposed by Rodriguez et al. (2015) [1], identifies the behavior of the system in each phase, the integrated product policies proposed by the author contributes to decreasing the material on landfill, energy consumption and increasing recycled material being reinstated to the production process. In order to measure the impact of two of the policies proposed by the author we propose a model of mix integer programming that minimizes the material on landfill and energy consumption reordering the resources in the simulation period. The solution of optimization model is evidence that joint work between simulation and optimization, are tools that can be achieve good scenarios without forgetting the limitations of each of the tools, as in this case you can achieve an optimal scenario with a 98% improvement in terms of recycling material being reinstated to the production process and 99% decrease in energy consumption.

## Tabla de contenido

Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstrac.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Objetivos y pregunta de investigación.....	2
1.2.1. Pregunta de investigación.....	2
1.2.2. Objetivo general:.....	2
1.2.3. Objetivos específicos:.....	2
1.3. Alcance y limitaciones.....	2
1.4. Metodología.....	2
2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.....	5
2.1. Caracterización de la población.....	5
2.2. Dinámica de sistemas como herramienta de modelamiento.....	5
2.3. Caso de estudio.....	7
2.3.1. Producción y comercialización.....	7
2.3.2. Uso.....	8
2.3.3. Fase Fin de Vida.....	10
2.4. Configuración del sistema.....	11
2.5. Configuración de la cadena de abastecimiento.....	12
2.6. Descripción y Selección de las políticas de producto integrado aplicadas al modelo de optimización.....	14
2.6.1. <i>Eliminación de sustancias contaminantes</i> .....	15
2.6.2. <i>Incorporación de materiales reciclados</i> .....	15
2.6.3. <i>Impuestos al consumidor para el reciclado</i> .....	16
2.6.4. Variaciones en el costo de la energía.....	16
2.6.5. Cambio de eficiencia intra-tecnología.....	16
2.6.6. Selección de políticas.....	17
3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	19
3.1. Revisión de la literatura.....	19
3.2. Construcción del modelo de optimización.....	22

3.2.1.	Descripción de los supuestos y las condiciones del modelo.....	23
3.2.2.	Condiciones de la política de incorporación de material reciclado. ....	25
3.2.3.	Condiciones de la política de variación al precio de la energía. ....	26
3.3.	Formulación del modelo matemático para la fase de Fin de vida en el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá. ....	26
4.	SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.....	32
4.1.	Validación del modelo.....	32
4.1.1.	Variable material reciclado .....	32
4.1.2.	Variable precio de la energía.....	32
4.2.	Análisis de resultados.....	33
4.2.1.	Resultados del modelo de optimización .....	33
5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICADE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.....	36
6.	CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS.....	45
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
	ANEXOS .....	i

## Lista de tablas

Tabla 1.	Metodología. (Elaboración propia).....	4
Tabla 2	Material Reincorporado al proceso productivo Vs. Descuento. ....	15
Tabla 3	Etiquetas de eficiencia energética Vs. Costo de la luminaria. ....	17
Tabla 4.	Porcentaje de mejoramiento de los instrumentos de política. ....	17
Tabla 5	Variables, tipo de modelo y metodología de solución. (Elaboración propia) .....	21
Tabla 6	Material Reincorporado al proceso productivo Vs. Descuento. ....	26
Tabla 7	Validación política incorporación material reciclado. (Elaboración propia) .....	32
Tabla 8	Validación política variación del precio de la energía. (Elaboración propia) .....	33
Tabla 9.	Porcentaje de variación de la política incorporación de material reciclado para cada escenario. (Elaboración propia) .....	33
Tabla 10	Porcentaje de variación de la política variación del precio de la energía para cada escenario. (Elaboración propia) .....	34
Tabla 11.	Resultados para el estado actual del sistema en cada una de las dos herramientas. (Elaboración propia).....	36
Tabla 12.	Confrontación de resultados política 1 material reciclado. (Elaboración propia).....	37
Tabla 13.	Confrontación de resultados política 1 Consumo de energía. (Elaboración propia) .....	37
Tabla 14.	Confrontación de resultados política 1 Material en Relleno. (Elaboración propia).....	39
Tabla 15.	Confrontación de resultados política 2 material reciclado. (Elaboración propia).....	40
Tabla 16.	Confrontación de resultados política 2 material en relleno. (Elaboración propia) .....	41

Tabla 17. Confrontación de resultados política 2 consumo de energía. (Elaboración propia) .....	42
---	----

## Lista de figuras

Figura 1. Nivel y Flujo. (Elaboración propia) .....	6
Figura 2. Ejemplo modelo iThink. (Elaboración propia) .....	6
Figura 3. Fase de Producción y comercialización. (Elaboración propia) .....	8
Figura 4. Fase de Uso. (Elaboración propia).....	10
Figura 5. Diagrama de forrester. Tomado de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] .....	12
Figura 6. Grafo de la Cadena de Abastecimiento de las luminarias en Bogotá. (Elaboración propia) .....	13
Figura 7. Ahorro en el consumo de energía sin crecimiento poblacional (Elaboración propia).....	18
Figura 9. Tasa de utilización Tu. ....	23
Figura 10. Precio de la energía (Pre). ....	24
Figura 11. Calculo de las horas de uso. ....	25
Figura 12 Ahorro de energía para la política incremento en el precio. (Elaboración propia) .....	35
Figura 13. Material Reciclado política 1. (Elaboración propia) .....	37
Figura 14. Consumo de energía, política 1. (Elaboración propia). ....	38
Figura 15. Migración de Luminarias política 1. (Elaboración propia).....	39
Figura 16. Material en Relleno política 1. (Elaboración propia).....	40
Figura 17. Cantidad de material reciclado política 2. (Elaboración propia) .....	41
Figura 18. Cantidad de Material en relleno política 2. (Elaboración propia) .....	42
Figura 19. Consumo de energía política 2. (Elaboración propia) .....	43
Figura 20. Migración de Luminarias política 2. (Elaboración propia).....	44

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Problemática

Las acciones hacia la prevención ambiental cada vez son más comunes, debido al grande impacto ambiental que produce la interacción de las personas con el medio ambiente, es así como la necesidad de medir el impacto ambiental generado en los procesos productivos es prioritaria, convirtiendo el análisis del ciclo de vida de los productos en una herramienta fundamental en la medición del mismo, ya que permite cuantificar el uso de recursos y emisiones ambientales del sistema evaluado en cada una de las fases que lo componen [2].

Las fases el ciclo de vida caracterizan el producto desde su origen hasta su fin, identificando cuatro etapas fundamentales para cualquiera de ellos, la primera fase corresponde a la Extracción de Materias Primas, en esta fase se identifican las materias primas que componen el producto y se evalúa su potencial de reciclado, la segunda fase llamada Producción, es en la que se realiza el proceso de transformación de las materias primas y ensambles que conforman el producto final, la tercera fase es la de Uso, donde se involucran las decisiones de compra y los hábitos de uso del usuario, por ultimo esta la fase de Fin de vida, en la que se recicla el material que puede reincorporarse al proceso productivo, y el material restante es enviado al relleno sanitario [3].

Todos los productos en su fase de Producción generan un consumo elevado de energía proveniente de diferentes fuentes, sin embargo los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), las edificaciones y los medios de transporte, generan un consumo adicional de energía en su fase de Uso, contribuyendo al calentamiento global, gases efecto invernadero y el deterioro del medio ambiente. Los AEE pueden ser encontrados en: las oficinas y hogares, representados por: neveras, lavadoras, secadoras de ropa, televisores, computadoras, celulares, teléfonos, lámparas, bombillas, secadoras de cabello y planchas entre otros [4].

Los 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 (extracción de materias primas, producción, uso y Fin de vida). Sin embargo las luminarias tiene una característica especial, pues generan alrededor del 90% de su impacto ambiental durante la fase de uso, dependiendo del tipo de luminaria disponible en el mercado, siendo las más comunes: Incandescente, Fluorescente Compacta, Halógena, Led, Fluorescente Tubular y Tubular Led. Sin embargo las llamadas ahorradoras o Fluorescentes que son las más comunes en los hogares son las más contaminantes por contener gas de mercurio [5] [1].

Es por esto que Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] realizan un estudio del ciclo de vida de las luminarias contextualizado en Bogotá desde la perspectiva de dinámica de sistemas, los autores evalúan diferentes políticas de producto integrado PPI que son simuladas con la ayuda del software iThink, permitiendo identificar las políticas que generan mejores resultados en términos del consumo de energía y de material reciclado que es reincorporado al proceso productivo.

El presente trabajo se propone como una extensión a la investigación realizada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] encaminado a la medición del impacto de las PPI a través de la construcción de un modelo matemático de optimización que permita la toma de mejores decisiones en relación con las PPI.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.2. Objetivos y pregunta de investigación.

#### 1.2.1. Pregunta de investigación

¿Cuál es el modelo matemático que permite medir el impacto de las políticas de producto integrada, aplicadas a la fase de vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá?

#### 1.2.2. Objetivo general:

Medir el impacto de las políticas de producto integrado PPI seleccionadas, mediante la construcción de un modelo matemático que describa la fase de Fin de vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, mediante la comparación de resultados entre dinámica de sistemas y el modelo propuesto.

#### 1.2.3. Objetivos específicos:

- i. Enunciar las relaciones del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá descritas en el modelo de dinámica de sistemas y determinar cuáles de las PPI propuestas serán objeto de estudio, en el marco del trabajo realizado por Rodríguez LA. et. al. (2015) [1].
- ii. Formular el modelo matemático, de la fase de Fin de Vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, que minimice la cantidad de material en el relleno, a partir de las relaciones planteadas por Rodríguez. LA. et. al. (2015) [1] en su modelo de dinámica de sistemas.
- iii. Solucionar el modelo matemático propuesto.
- iv. Analizar y comparar los resultados obtenidos, mediante el modelo matemático y la simulación propuesta por Rodríguez LA. et. al (2015) [1], para los instrumentos de política de producto integrada, seleccionados, que impactan la fase de Fin de Vida.

### 1.3. Alcance y limitaciones.

El alcance del presente trabajo es la construcción y solución de un modelo de optimización que permita representar el comportamiento del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá teniendo como punto de partida el modelo de dinámica de sistemas propuestos por Rodríguez LA. et. al. (2015) [1]. Adicionalmente el modelo de optimización debe permitir medir el impacto de las PPI seleccionadas.

En cuanto a las limitaciones de la investigación, el tiempo para la ejecución del proyecto no permite la construcción de un modelo de optimización más robusto, no lineal, que refleje el dinamismo del modelo de dinámica de sistemas propuesto por Rodríguez LA. et. al. (2015) [1].

### 1.4. Metodología.

La metodología usada en el desarrollo del proyecto está dividida en cuatro etapas, la primera de ellas es la descriptiva, en la cual se enuncia las relaciones existentes en el ciclo de vida de las luminaria en Bogotá, para ello se explora a fondo el modelo de dinámica de sistemas planteado por (Rodríguez LA. et. al. 2015) [1]. En la segunda etapa se realiza una revisión de la literatura en donde se identifican las herramientas teóricas que permiten diseñar un modelo de optimización y determinar las técnicas de solución comúnmente usadas. En la tercera etapa se soluciona el modelo por la técnica seleccionada. Por último con los resultados obtenidos del modelo de optimización y los encontrados por (Rodríguez LA. et. al. 2015) se realiza una comparación e identificación del impacto del modelo de optimización en las PPI en la fase de Fin de Vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá. El detalle de la metodología a desarrollar se presenta en la Tabla 1:

## 1. INTRODUCCIÓN

Objetivo	Actividad	Recurso	Entregable
<p>Enunciar las relaciones del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá descritas en el modelo de dinámica de sistemas y determinar cuáles de las políticas propuestas serán objeto de estudio, en el marco del trabajo realizado por Rodríguez LA. et. al. (2015) [1].</p>	<p>Expresar las relaciones existentes en el modelo de dinámica de sistemas propuesto por Rodríguez LA. Et. Al. (2015) [1], de tal forma que puedan ser entendidas y llevadas a una formulación matemática. Definir cuáles de las políticas aplicadas al modelo de dinámica de sistemas son objeto de estudio por su influencia en la fase de Fin de Vida.</p>	<p>Rodríguez LA. et. al. (2015) [1]</p>	<p><b>Capítulo 2:</b> Contextualización del ciclo de vida y las políticas de producto integradas para el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá.</p>
<p>Diseñar y Formular un modelo de optimización de la fase de Fin de Vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá a partir de las relaciones planteadas por Rodríguez. LA. et. al. (2015) [1] en su modelo de dinámica de sistemas.</p>	<p>Revisión de la literatura, que permita diseñar y formular el modelo de optimización que minimice la cantidad de material desechado en el relleno para el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá.</p>	<p>Bibliografía Propuesta.</p>	<p><b>Capítulo 3:</b> Diseño y Formulación del modelo de Optimización.</p>

## 1. INTRODUCCIÓN

Objetivo	Actividad	Recurso	Entregable
Solución del modelo de optimización	<p>Seleccionar el método de solución adecuado para el modelo propuesto.</p> <p>Definir las características principales para el modelo y finalmente selección del software para la programación del modelo.</p>	Bibliografía propuesta y software para la programación del modelo.	<b>Capítulo 4:</b> Solución del modelo de optimización propuesto.
Analizar y comparar los resultados obtenidos, mediante el modelo de optimización y la simulación propuesta por Rodríguez LA. et. al (2015) [1], para los instrumentos de política, seleccionados, que impactan la fase de Fin de Vida	Comparar los resultados obtenidos por los dos métodos y determinar la contribución que tiene el modelo de optimización frente al modelo de dinámica de sistemas.	Rodríguez LA. et. al. (2015) [1] y resultados obtenidos por el método de optimización	<b>Capítulo 5:</b> Comparación de resultados iThink Optimización.

Tabla 1. Metodología. (Elaboración propia)

## **2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.**

El presente capítulo se encarga de contextualizar al lector en el desarrollo del trabajo presentado por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] describiendo cada una de las etapas que lo componen. En primer lugar se caracteriza la población en la que se desarrolla el estudio, seguido de la descripción del funcionamiento de la herramienta (Dinámica de Sistemas) que es utilizada para desarrollar la simulación, en tercer lugar se describe el caso de estudio planteado, explicando el comportamiento de las fases del ciclo de vida y la relación existente entre ellas, y por último se detallan los instrumentos de política analizados por los autores y se seleccionan las políticas que generan menor impacto ambiental en el ciclo de Fin de Vida.

### **2.1. Caracterización de la población**

Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] en su artículo analizan el ciclo de vida de las luminarias, se toma a Bogotá como centro de estudio, ya que alberga alrededor de 8 millones de habitantes que se distribuyen socio económicamente en estratos del 1 al 6, siendo el estrato 1 la población con el menor poder adquisitivo y el estrato 6 el de mayor poder adquisitivo, convirtiendo a la población bogotana en el foco de interés para el desarrollo de instrumentos de PPI que permitan reducir los impactos ambientales.

El estudio realizado por los autores inicia con la aplicación de 150 encuestas distribuidas en los 6 estratos socioeconómicos, en la que se refleja el conocimiento y el interés de la población en los procesos de reciclado de un bien de uso diario, como son las luminarias, así mismo la encuesta refleja las condiciones de uso, en términos de horas de uso y cantidad de luminarias de las diferentes tecnologías que son utilizadas en los hogares, como las Incandescente, Fluorescente Compacta, Fluorescente Tubular, Vapor de Mercurio, Mercurio Halogenado, Vapor de Sodio Alta Presión, Halógenas y Led.

Al analizar los resultados de las encuestas Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] deciden centrar su estudio en los estratos socioeconómicos 3 y 4, ya que representan el 45% de la población de Bogotá que cuentan con un ingreso entre los \$520 – \$1040 dólares mensuales per cápita, evidenciando que el 37% de los hogares de estos estratos poseen luminarias Fluorescentes, el 29% usan Incandescentes y Fluorescentes y el 11% usa una combinación de Fluorescente Tubular, Compacta Fluorescente e Incandescente, llegando a la conclusión que más del 77% de la población cuenta con luminarias que usan gas de mercurio, convirtiéndose en el segmento representativo para estudiar el comportamiento de la población frente a las PPI propuestas en ese mismo estudio.

### **2.2. Dinámica de sistemas como herramienta de modelamiento**

Antes de profundizar en las relaciones del ciclo de vida de las luminarias es indispensable entender los conceptos de dinámica de sistemas utilizados para el análisis del ciclo de vida de las luminarias. Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] soportan su estudio en dinámica de sistemas con el software iThink.

Dinámica de sistemas es una herramienta usada para la interpretación de modelos complejos que requieren un análisis en largos espacios de tiempo, en donde se desea estudiar el comportamiento del sistema modelado en cada uno de los periodos de tiempo, y no solo un resultado al final del

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

periodo de simulación, o como lo expresa (Carrá. 2008) “no solo interesa una fotografía de la situación sino la película del desarrollo de la misma, con la cual se puede predecir el futuro.” [6].

La dinámica de sistemas tiene sus orígenes en el pensamiento sistémico, el cual empezó a desarrollarse en Europa y Estados Unidos en la década de los 90 con el fin de resolver problemas de matemática, física, química, sociología y ciencias sociales entre otros, con el soporte de programas de computador [6]. Hoy en día se conocen paquetes como STELLA, VENSIM e iThink entre otros.

Dinámica de sistemas maneja como lenguaje para la construcción de modelos la definición de componentes esenciales a saber: el Stock o Nivel y el Flujo que deben crear bucles, o cadenas cerradas de relaciones causales, y ser realimentados entre sí para poder formar un sistema dinámico. El Stock o Nivel está definido como la cantidad, ya sea de un material o de un producto, que se acumula a lo largo del tiempo y que es modificado por los flujos de entrada o de salida, su valor indica el estado del sistema en cualquier periodo del tiempo de la simulación. Mientras que el flujo es el que permite el cambio en el Stock o Nivel a través del tiempo, siendo éste el que permite el dinamismo en los Niveles y es medido en unidades por periodo de tiempo [6].

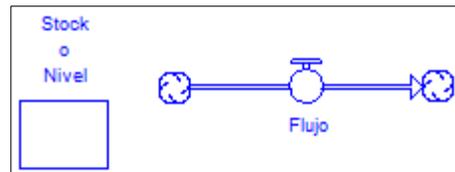


Figura 1. Nivel y Flujo. (Elaboración propia)

Sin embargo los modelos solo con Niveles y Flujos no podrían generar un sistema de interrelaciones, por lo que se usan también convertir o variables auxiliares, con los que se pueden definir ecuaciones, constantes o parámetros necesarios que intervienen en el modelo, y conectores causales que permiten transmitir la información y genera relaciones causa efecto o funcionales entre los elementos del modelo [6].

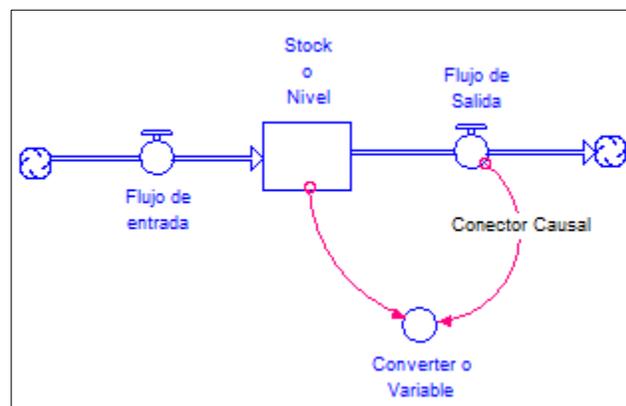


Figura 2. Ejemplo modelo iThink. (Elaboración propia)

En los siguientes sub-capítulos, caso de estudio, se explica la relación existente entre las variables auxiliares, flujos y niveles, que proporcionan el balance dentro de las fases a estudiar. La explicación se desarrollará desde lo general hacia lo particular, empezando por los niveles y luego se profundiza en la descripción de los flujos y las variables auxiliares que componen el modelo.

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

Cabe anotar que en los sistemas dinámicos es muy difícil identificar el inicio y fin del sistema, debido a su interacción y la generación de bucles, sin embargo en el caso de estudio presentado a continuación se explica primero la fase de Producción y Comercialización, luego la fase de Uso y por último la fase de Fin de Vida, dejando claro que esta última no es el fin del ciclo, pues el proceso se retroalimenta con la recuperación de material que se reincorpora a la fase de Producción.

### 2.3. Caso de estudio

En su estudio Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] centran su análisis en el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá buscando entender las relaciones Causa-Efecto del sistema, así como la retroalimentación entre las diferentes variables que caracterizan el ciclo de vida de las luminarias. Adicionalmente representa el comportamiento del consumidor bogotano en la toma de decisión de compra y uso de los diferentes tipos de luminarias disponibles en el mercado, que para el caso son:

- Incandescente (Inc),
- Fluorescente Compacta (FC),
- Halógena (Hal),
- Led,
- Fluorescente Tubular (FT) y
- Led Tubular (TLED).

El ciclo de vida planteado por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], recorre tres fases fundamentales: 1. Producción y Comercialización, 2. Uso y 3. Fin de Vida. En la fase de producción se contempla la relación entre la exportación, la importación y la fabricación con materias primas nuevas y con material reciclado, en la fase de uso se 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, mientras que la fase de Fin de Vida se concentra en 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.

Para entender cada una de las fases estudiadas por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] es necesario ahondar en su comportamiento y las relaciones existentes dentro de cada fase y como se comunican entre ellas. A continuación se presenta dicho análisis.

#### 2.3.1. Producción y comercialización

En esta fase se explican las relaciones existentes entre los niveles, producción de luminarias y luminarias disponibles para la venta.

El nivel producción de luminarias ( $Pl_i$ ) 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 ( $i$ ) estudiadas. 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 el nivel producción de luminarias tienen dos flujos de salida, el primero corresponde a las exportaciones ( $Ex$ ), que representa un porcentaje de la producción de cada tipo de luminaria y el segundo representa la cantidad de luminarias que quedan disponibles para la venta de la producción nacional ( $Pd_n$ ).

CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

$$Pl_i = MP_n + MP_r - Ex - Pd \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otra parte el nivel de luminarias disponibles para la venta ( $Lv$ ) está influenciado por dos flujos que lo alimentan y un flujo que lo disminuye, el primer flujo de entrada es el mismo flujo de salida de la producción nacional disponible para la venta ( $Pd_n$ ) y el segundo flujo corresponde a la importación de luminarias ( $Im$ ). Así mismo el flujo que disminuye la cantidad de luminarias disponibles para la venta es la demanda ( $D_i$ ).

$$Lv = Pd_n + Im - D_i \quad \text{Ecuación 2}$$

En la Figura 3. se muestra de forma gráfica las relaciones existentes en esta fase:

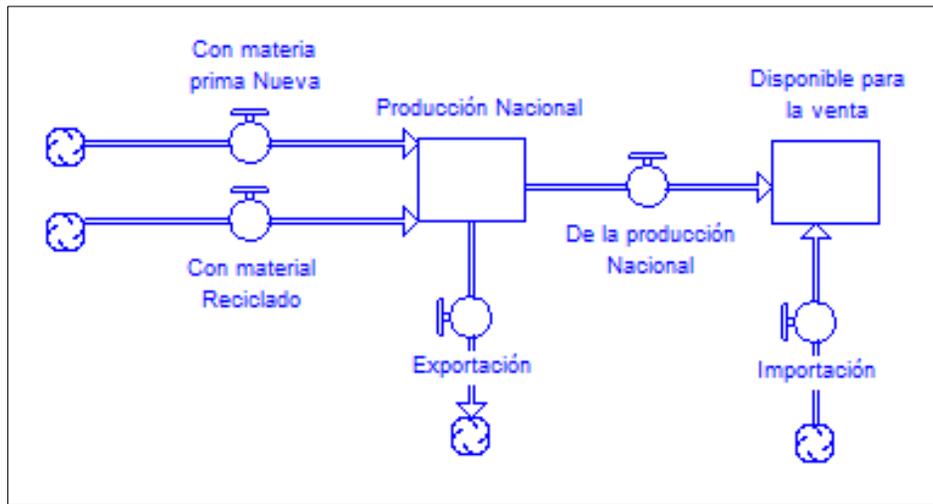


Figura 3. Fase de Producción y comercialización. (Elaboración propia)

### 2.3.2. Uso

Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] en la fase de Uso representan el comportamiento del consumidor, en cuanto a las decisiones de compra y cantidad de horas que deben mantener las luminarias prendidas o apagada, así como el cambio de luminarias a las cuales se les termino su vida útil, permitiendo el equilibrio entre las luminarias que llegan al fin de su vida útil y las que son compradas para reemplazarlas.

En esta fase Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] consideraron que el nivel inicial del sistema tiene un número determinado de luminarias en uso ( $Luso_i$ ), 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.

$$Luso_i = 7 * H * \%U_i \quad \text{Ecuación 3}$$

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

Al tener definido el estado inicial del sistema, Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] explican el cambio de luminarias a través de 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 ( $Vu$ ) y el cambio percibido por el usuario ( $Cp$ ). La frecuencia de cambio ( $Fc_i$ ) 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 ( $LC_i$ ) de cada tipo.

$$Fc_i = \min(Vu, Cp) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$LC_i = \sum_{i=1}^6 Fc_i * Luso_i \quad \text{Ecuación 5}$$

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 Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] hacen el supuesto que el consumidor solo migra a la tecnología de mayor eficiencia siguiente, 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.

Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] explican la decisión del consumidor frente al cambio de tecnología 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.

$$D_i = L_i + L_{i-1} \quad \text{Ecuación 6}$$

Adicionalmente Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] suponen 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.

CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

Esta fase se puede explicar de la siguiente manera Figura 4:

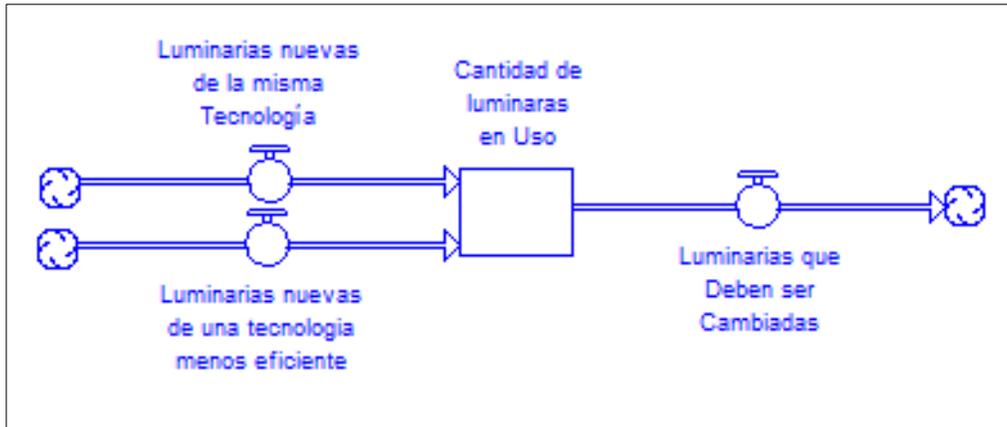


Figura 4. Fase de Uso. (Elaboración propia)

### 2.3.3. Fase Fin de Vida

En esta fase Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] enfocan gran parte de su análisis, ya que es la fase que refleja el comportamiento del consumidor y la que permite la medición del impacto al medio ambiente. Las PPI diseñadas por los autores 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 al disminución del material que es llevado al relleno sanitario.

Esta fase está compuesta por tres niveles, contaminante ( $Con$ ), material reciclado ( $Mp_r$ ) 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 ( $Rec_f$ ) y reciclado informal ( $Rec_{in}$ ). 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.

$$Rs = LC_i * Rec_f + LC_i * Rec_{in} \quad \text{Ecuación 7}$$

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 ( $Mp_r$ ), flujo que cierra el ciclo al unirse con la fase de Producción y comercialización y que es expresado de esta forma:

$$Mp_r = LC_i * (1 - Rec_f) + LC_i * (1 - Rec_{in}) \quad \text{Ecuación 8}$$

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

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

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.

$$Con = (fc_f + ft_f) * \%rec_f + (fc_{in} + ft_{in}) * \%rec_{in} \quad \text{Ecuación 9}$$

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 contaminante para ser procesado. 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 recicladores 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 por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

Así mismo los autores proponen un límite de capacidad del relleno sanitario Doña Juana ( $CapRs$ ), al que llegan todas 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.

$$CapRs = 8'750.000.000 \text{ gramos.} \quad \text{Ecuación 10}$$

De igual manera Rodríguez. LA. et al. (2015) [7] suponen 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 se puede transformar en energía y hacer que su precio se reduzca. Para este supuesto los autores proponen: 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%.

Una vez explicado el modelo de dinámica de sistema propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] que representa el sistema, en cada una de sus fases y la interacción entre las mismas, los autores explican los 5 instrumentos de política de producto integrado diseñados para intervenir en el modelo propuesto, permitiendo encontrar las políticas que tienen mayor impacto en sus variables de interés: 1. Material reciclado que es reincorporado al proceso productivo y 2. Consumo de energía. A continuación se describen cada una de las políticas y se justifica la selección de las políticas que van a ser estudiadas en el modelo de optimización.

### 2.4. Configuración del sistema.

El sistema descrito por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] para el ciclo de vida de las luminarias se muestra a continuación en el diagrama de forrester, el diagrama presenta las etapas principales del sistema, Producción y comercialización, Uso y Fin de Vida. La fase de producción está conformada por el cuadro de color rosa en la parte inferior derecha del diagrama, la fase de Uso corresponde al

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

recuadro azul en la parte superior derecha del diagrama, mientras que la fase de Fin de Vida está compuesta por los cuadros amarillo, rojo y verde del lado izquierdo del diagrama.

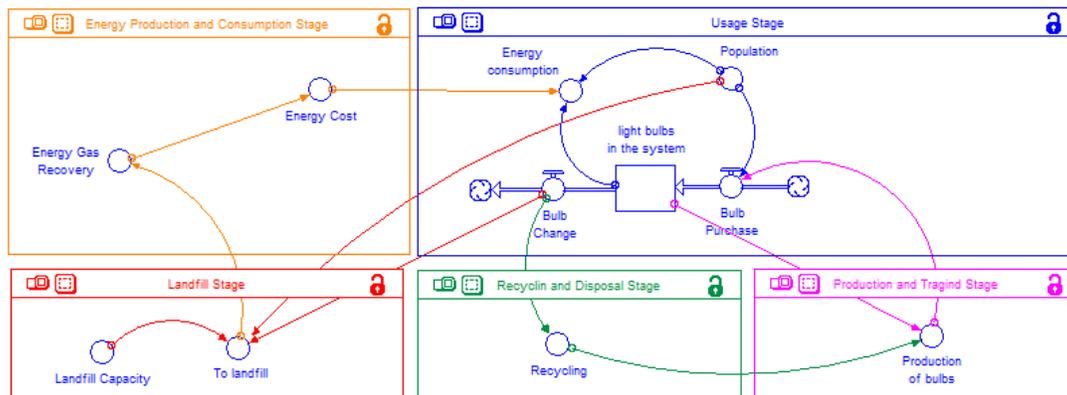


Figura 5. Diagrama de forrester. Tomado de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1]

Dentro del ciclo de vida de las luminarias planteado por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] se evidencian ciclos de balance y ciclos de refuerzo. Los ciclos de balance garantizan una estabilidad en el sistema, un ejemplo de ello es el ciclo entre las fases de Producción y comercialización y Uso al garantizar la satisfacción de la demanda evitando incrementos inesperados y usos excesivos de luminarias, otro de los ciclos de balance identificados involucra las tres fases del sistema, Producción y comercialización, Uso y Fin de vida, ya que la captura de material reciclado que proviene de la fase de Uso es direccionada a la fase de producción y reincorporada al proceso productivo de fabricación de luminarias.

Por otro lado los ciclos de refuerzo que se evidencian, están presentes en la fase de Uso y la de Fin de vida, en términos del material que es llevado al relleno sanitario, agotando la capacidad del mismo. Al mirar en detalle el comportamiento del consumidor se evidencian ciclos de refuerzo en términos del comportamiento de las luminarias en relación al consumo de energía, ya que entre mayor es el consumo de energía la migración a luminarias más eficientes se acelera.

### 2.5. Configuración de la cadena de abastecimiento.

Una vez entendida la configuración del sistema se hace necesario también comprender la configuración de la cadena de abastecimiento que lo compone ya que al proponer e implementar las políticas de producto integrado la cadena de abastecimiento del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá se ve sujeta a modificaciones importantes en su estructura, pues considera la creación y fortalecimiento de eslabones, al hacer que las plantas de reciclado sean un actor importante de la cadena.

En la cadena de abastecimiento del ciclo de vida de las luminarias intervienen 4 grandes actores, el productor, el consumidor, el relleno sanitario y el reciclador o planta de reciclado. Estos actores están directamente relacionados con las fases del ciclo de vida, encontrando que en la fase de producción y comercialización el fabricante o productor es el actor principal, en la fase de uso el consumidor y sus decisiones de compra y cultura del reciclado lo convierten en el actor principal de esta fase y por último en la fase de fin de vida el relleno sanitario, el reciclado o planta de reciclado son los dos actores que la componen. Las relaciones existentes entre los actores están caracterizadas por el flujo de luminarias o materia prima, el cual va a ser descrito a continuación.

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

La relación entre el productor y el consumidor es una relación de flujo de material donde el productor satisface la necesidad de luminaria del cliente, identificada como la relación existente entre la fase de producción y comercialización y la fase de uso, mientras que el cliente presenta dos tipos de relación, las relaciones formales y las relaciones informales, estas relaciones son las existentes entre la fase de uso y la fase de fin de vida al enviar las luminarias al relleno sanitario o a la planta de reciclado. En la primera de estas relaciones, canal formal, el cliente es responsable de depositar sus luminarias dañadas en los sitios de disposición para su reciclado formal, y en la segunda, canal informal, el consumidor envía las luminarias dañadas al relleno sanitario al mezclar todos los desechos y no separar. Por último la relación existente entre la planta de reciclado y el productor refleja la relación entre la fase de fin de vida y la fase de producción y comercialización, al enviar el material que puede ser reincorporado al proceso productivo. Al tener en cuenta las reacciones de flujo de material propias de la cadena de abastecimiento por parte del consumidor, las políticas de producto integrado pretenden fortalecer estas relaciones al disminuir la cantidad de material que es enviado al relleno sanitario y aumentando la cantidad de material que es reincorporado al proceso productivo como material reciclado.

La Figura 6 muestra las relaciones existentes en la cadena de abastecimiento de las luminarias en Bogotá como el caso de estudio planteado, y en donde las políticas de producto integrado contribuyen al fortalecimiento de los eslabones entre el productor, el consumidor y las plantas de reciclado, contribuyendo a la disminución del material enviado al relleno sanitario y al aumento del material reciclado que es reincorporado al proceso productivo, haciendo que la cadena de suministros sea amigable con el medioambiente.

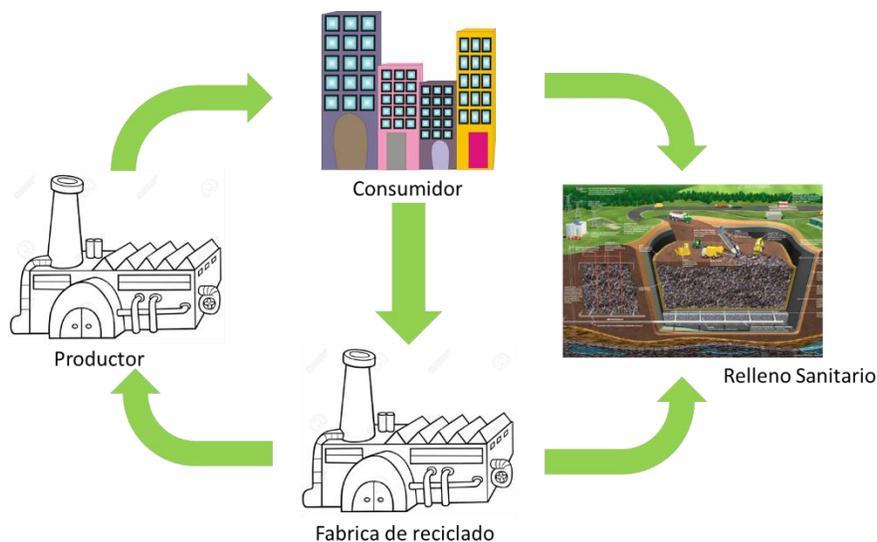


Figura 6. Grafo de la Cadena de Abastecimiento de las luminarias en Bogotá. (Elaboración propia)

Entendida el sistema planteado y la cadena de abastecimiento a continuación se describen las políticas de producto integrado PPI que afectarán el sistema y pretenden fortalecer los eslabones de la cadena de abastecimiento, reducir la producción de contaminante y aumentar la reincorporación de material reciclado en el proceso de producción.

## **2.6. Descripción y Selección de las políticas de producto integrado aplicadas al modelo de optimización.**

Con el crecimiento de las economías a lo largo de la historia se evidencia un aumento en el consumo de productos de todo tipo, que en su mayoría contienen materiales de difícil degradación y sustancias contaminantes generando un alto impacto en el medio ambiente. Sin embargo en 1992 en la Declaración de Río sobre medio ambiente se planteó el desarrollo de productos más ecológicos, permitiendo una disminución en el consumo de recursos, y produciendo menos efectos y riesgos para el medio ambiente, al evitar la generación de residuos desde su fabricación a través del desarrollo de las PPI [8].

Las PPI son un conjunto de instrumentos administrativos enfocados en los principios de quien contamina paga, diseños ecológicos y elecciones informadas del consumidor, que pretenden complementar las políticas medioambientales existentes y generar mejoras en los productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida y cadena de suministros, permitiendo llegar a procesos eficientes y de aceptación por parte de los consumidores [8] [9].

El enfoque de las PPI *“se centrará principalmente en el diseño ecológico de los productos y en la generación de información e incentivos para un uso eficiente de productos”* [8], es por esto que Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] seleccionan 5 instrumentos de política que tiene como objetivo incentivar a: i) los productores a rediseñar el producto, incorporando materiales reciclados en los procesos productivos y ii) los consumidores sobre el uso de los canales formales de reciclaje, la disminución del consumo y el uso responsable de la energía.

Los 5 instrumentos de política seleccionadas por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] se enfocan en la adecuada administración de las luminarias en las diferentes fases del ciclo de vida, planteado instrumentos de políticas administrativas, económicas e informativas. Las políticas administrativas o comunitarias, como las llama la comisión de las comunidades europeas, son las que han sido construidas comunitariamente por las empresas productoras, autoridades locales y estatales permitiendo difundir sus experiencias positivas y generar productos ecológicos, un ejemplo de ello son las leyes, en cuanto a restricciones de uso de material peligroso o la responsabilidad extendida a los productores, definiendo el uso mínimo de material reciclado, los sistemas de recuperación y recolección y los estándares en las redes de manufactura.[8]

Las políticas económicas son aquellas en las que los impuestos o subsidios afectan tanto al productor como al consumidor, un ejemplo de este tipo de políticas pueden ser los impuestos por el uso de materiales contaminantes. Y por último las políticas informativas son las que proporcionan al consumidor información acerca de los componentes del producto, su eficiencia energética para el caso de las luminarias o los aparatos eléctricos y electrónicos e información de la forma de reciclado y disposición, haciendo que las decisiones del consumidor estén basadas en la información proporcionada[8].

La eliminación de sustancias contaminantes, incorporación de materiales reciclados, impuestos al consumidor para el reciclaje, variaciones en el precio de la energía y el cambio de eficiencia intratecnología son los 5 instrumentos de política planteados por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1]. El comportamiento de los instrumentos de política es simulado en el sistema descrito mediante la herramienta iThink, la simulación tiene un periodo de análisis de 50 años, ya que los autores consideran este como el tiempo adecuado para la obtención de resultados concluyentes. Estos

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

instrumentos serán explicados con mayor detalle a continuación, mencionando qué es el instrumento, cómo se modeló y los resultados que se obtuvieron en cuanto a material reciclado y consumo de energía para el periodo de análisis.

### **2.6.1. Eliminación de sustancias contaminantes**

Esta política administrativa está enfocada a la eliminación de sustancias peligrosas (gas de mercurio) presentes en dos tipos de luminarias, Compactas Fluorescentes y Fluorescentes Tubulares, esto debido al alto impacto que genera para el medio ambiente y la salud humana el proceso de recolección y reciclado inadecuado, que permite la liberación del gas de mercurio en fuentes hídricas, rellenos sanitarios y el aire.

El uso de esta política pretende eliminar estos 2 tipos de luminarias del mercado en un periodo de 8 años, para un horizonte de simulación de 50 años. Los resultados obtenidos para esta política fueron un aumento repentino en las luminarias Halógenas debido a que son las luminarias con la siguiente mejor eficiencia después de las Fluorescentes Compactas, mientras que el comportamiento de las luminarias Tubular Led permaneció estable al realizar la simulación con la política. Por otro lado teniendo en cuenta las variables de interés (material reciclado y consumo de energía) se encontró que el porcentaje de material reciclado que se reincorpora al proceso productivo bajo la política de eliminación de contaminante en relación a las condiciones normales del sistema disminuyó en un 0.49%, mientras que el consumo de energía tuvo una disminución de 1.26% Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

### **2.6.2. Incorporación de materiales reciclados**

Para este instrumento económico de política, Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] plantearon la condición inicial o actual del sistema y 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 los productores incrementen la cantidad de material que se reincorpora al proceso productivo. La siguiente Tabla 2 muestra las condiciones iniciales y los escenarios planteados.

	<b>Tasa de Reincorporación</b>	<b>Descuento</b>
<b>Condición Inicial</b>	8%	0%
<b>Escenario 1</b>	28%	13%
<b>Escenario 2</b>	48%	23%
<b>Escenario 3</b>	68%	33%

*Tabla 2 Material Reincorporado al proceso productivo Vs. Descuento.  
Traducción realizada de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].*

Rodríguez. LA. et al. (2015)[1], plantean que 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 Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] encuentran 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

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

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%.

### **2.6.3. Impuestos al consumidor para el reciclado**

El desarrollo de este instrumento de política económico tiene como objetivo para Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] el introducir un impuesto del 10% en el valor de las luminarias, con el fin de soportar la infraestructura logística y operacional de una planta de reciclado. Adicionalmente las luminarias que usan gas de mercurio, Fluorescentes Compactas y Fluorescentes Tubulares, deberán agregar un costo fijo a pagar para tratar correctamente el contaminante.

Después de realizar la simulación de la política en el horizonte de planeación Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] encontraron que los cambios en el material reincorporado con relación a las condiciones iniciales es del 2,25% mayor, mientras que se evidencia un aumento del 0.003% para el consumo de energía.

### **2.6.4. Variaciones en el costo de la energía**

Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] plantean este instrumento económico de política con el fin de evaluar el comportamiento del consumidor con respecto a la migración hacia tecnologías más eficientes y percibir los ahorros en el consumo de energía, para ello plantearon cuatro escenarios adicionales 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.

Por otro lado al realizar el análisis de las variables de interés Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] encuentran 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%

### **2.6.5. Cambio de eficiencia intra-tecnología**

La quinta y última política modelada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], corresponde a los instrumentos de política informativos, y fue diseñada para determinar el comportamiento de los consumidores. Para este instrumento de política se seleccionaron tres etiquetas informativas que representan la eficiencia energética para cada tipo de luminaria, la etiqueta tipo C representa el promedio de eficiencia energética más frecuente del mercado, la etiqueta B representa un incremento en la eficiencia energética del 20% y la etiqueta A representa un incremento del 50%. Este cambio en la eficiencia se ve reflejado en el valor de la luminaria, indicando que las más eficientes tendrán un mayor costo que la menos eficiente, en la Tabla 3 se muestra la relación eficiencia energética costo para cada tipo de luminaria.

Luminarias	Costo de las luminarias		
	Etiqueta C	Etiqueta B	Etiqueta A
Incandescente	\$ 1,568	\$ 2,100	\$ 2,408
Compacta Fluorescente	\$ 12,600	\$ 14,700	\$ 17,108
Fluorescente Tubular	\$ 5,236	\$ 6,720	\$ 8,400
Halógena	\$ 16,800	\$ 18,900	\$ 21,504

CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

LED	\$ 29,904	\$ 32,536	\$ 36,204
-----	-----------	-----------	-----------

Tabla 3 Etiquetas de eficiencia energética Vs. Costo de la luminaria.

Traducción realizada de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

Dentro de los resultados encontrados por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] se evidencia que no existe una diferencia significativa en el comportamiento del sistema al cambiar de etiqueta. Así mismo al evaluar las variables de interés encontraron que el material reciclado tiene un incremento de 2.38% en relación a las condiciones iniciales y adicionalmente el consumo de energía tiene un aumento del 0.034%.

### 2.6.6. Selección de políticas.

Para realizar la selección de los instrumentos de políticas que afectan directamente la fase de Fin de vida del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, se toma como evidencia los resultados de las variables de interés del modelo analizado por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], de tal forma que se puedan seleccionar las políticas que contribuyan a la minimización de residuos en el relleno, identificando el mayor porcentaje de mejoramiento encontrado en la variable material reciclado.

Instrumentos de política	Porcentaje de mejora	
	Material reciclado	Consumo de energía
Cambio de eficiencia intra-tecnología	2.38%	-0.03%
<b>Variación en el precio de la energía</b>	<b>2.79%</b>	<b>3.88%</b>
<b>Incorporación de material reciclado</b>	<b>36.74%</b>	<b>0.48%</b>
Eliminación del material peligroso	-0.50%	1.26%
Impuestos al consumidor por el reciclado	2.25%	0.00%

Tabla 4. Porcentaje de mejoramiento de los instrumentos de política.

Traducción realizada de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

Como se puede ver en la Tabla 4 la política de mayor contribución es la que contempla la reincorporación de material reciclado en el proceso productivo con un 36.74%, de reducción en la cantidad de material llevado al relleno sanitario, así mismo la política llamada variación del precio de la energía, proporciona el mayor ahorro en el consumo de energía total del sistema el cual corresponde a 3.88%. En relación a la variable consumo de energía una reducción de casi 4 por ciento es considerada de interés, debido a que el modelo de dinámica de sistemas contempla un incremento poblacional anual, el cual incrementa el consumo de energía, sin embargo al realizar la simulación con un crecimiento poblacional igual a cero para el escenario actual y para un escenario en donde se incrementa el precio de la energía en un 40%, se observa un ahorro de hasta el 22% en la variable consumo de energía como lo muestra la Figura 7. Una vez identificadas las políticas que generan mayores contribuciones a las variables de interés para Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], los autores realizan una simulación simultánea con los dos instrumentos de política encontrando que el porcentaje de material reciclado alcanza el 38,94% y el ahorro en el consumo de energía llega al 6,04%.

## CONTEXTUALIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y LAS POLÍTICAS DE PRODUCTO INTEGRADA PARA EL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ.

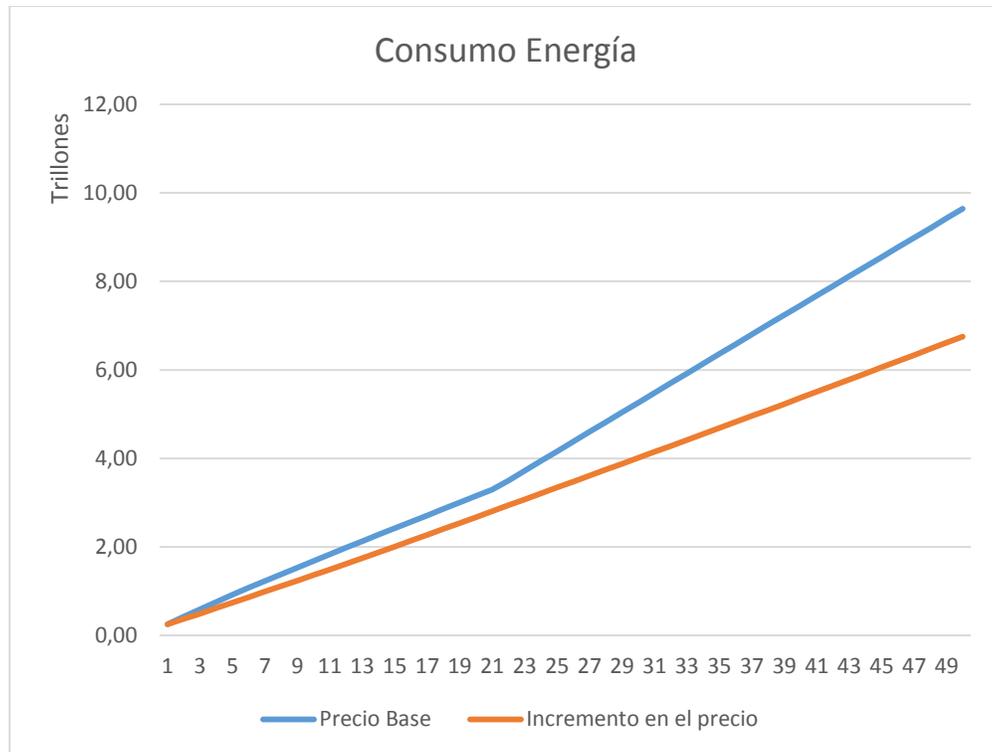


Figura 7. Ahorro en el consumo de energía sin crecimiento poblacional (Elaboración propia).

Como se puede observar en los resultados obtenidos por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] la sinergia de estas dos políticas, variación del precio de la energía e incorporación de material reciclado, proporciona mejores resultados que la simulación de cada una de ellas por separado. Sin embargo las otras políticas no presentan valores significativos en términos de cantidad de material reciclado ya que son inferiores al 3%, por lo que no son de interés para este estudio. Guardando concordancia con la investigación realizada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], la segunda variable de interés porcentaje de mejora en el consumo de energía no presenta valores significativos para los instrumentos de política restantes. Es por esto que se decide realizar un modelo de optimización que represente el comportamiento del sistema y permita evaluar el impacto de las políticas que muestran los mejores resultados, siendo estas, incorporación de material reciclado y variación en el precio de la energía.

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Para el diseño del modelo matemático de optimización, el cual pretende explicar el comportamiento del sistema dinámico planteado por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], y permita medir el impacto de las PPI en el ciclo de vida de las luminarias, se realizó una revisión de la literatura que tiene en cuenta los conceptos de ciclo de vida y modelos de optimización en conjunto. Para ello se identificaron las siguientes palabras clave: Modelos de optimización, análisis del ciclo de vida o LCA por sus siglas en inglés, optimización multi-objetivo, programación lineal y programación no lineal. Esta búsqueda fue realizada en la base de datos ScienceDirect y Springer, tomando los artículos con fecha de publicación 1999 a la actualidad. En el siguiente aparte se presentan los hallazgos más importantes de la búsqueda.

#### 3.1. Revisión de la literatura.

En 1999 Azapagic & Clift [10] proponen una metodología de cuatro pasos que permiten realizar un trabajo conjunto entre el LCA y los modelos de optimización de manera eficiente. El primero de ellos consiste en entender el ciclo de vida del producto en cada una de sus etapas o fases, el segundo consiste en identificar las variables que intervienen en el ciclo de vida y formular el modelo de optimización, el tercero se centra en el planteamiento del objetivo a cumplir y el cuarto paso consiste en desarrollar el análisis de los objetivos y la elección del método de solución.

El primer paso propuesto por Azapagic & Clift, en 1999 [10], también es entendido por otros autores como el balance de masa y energía, los cuales plantean en la mayoría de los casos ecuaciones en las que identifican los insumos del procesos, los cuales son igualados a las salidas del sistema permitiendo encontrar los puntos críticos del ciclo de vida como pérdidas de energía, cantidad de residuos generados, cantidad de contaminante producido al final del proceso entre otros [11], [12].

Una vez identificadas las ecuaciones de balance se plantean los modelos de optimización que pueden ser lineales o no lineales dependiendo del proceso que se esté analizando y de los objetivos planteados, en la mayoría de los casos los modelos son multi-objetivo. A continuación se presenta una tabla resumen, en donde se consolidan las variables analizadas, el tipo de modelo planteado y la metodología de solución utilizada (Tabla 5).

Autor	Cita	Variables			Tipo de problema		Método de solución			Tema de estudio	
		Económicas	Ambientales	Otras	Lineal	No lineal	Programación Entera	Heurística	E-Restricciones		Otro
LIU Zhexuan et al.	[13]	X	X	X	X				X		Cadena de suministros

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Autor	Cita	Variables			Tipo de problema		Método de solución				Tema de estudio
		Económicas	Ambientales	Otras	Lineal	No lineal	Programación Entera	Heurística	E-Restricciones	Otro	
Luis-Fernando Morales Mendoza et al.	[14]	X	X			X		X			Manejo de residuos
Benyamin Khoshnevisan, et al.	[15]		X		X			X			Cultivos orgánicos
Rober Brunet et al.	[16]	X	X			X	X				Plantas de producción Biotecnología
Jiangjiang Wanga et al.	[17]		X	X		X		X			Producción de Calefactores
Pablo Martínez & Ana María Eliceche	[18]	X	X			X	X				Plantas de producción Biotecnología
Andrei Kostin et al.	[19]	X	X		X		X				Cadena de suministros
Carla Pieragostini et al.	[20]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Revisión de la literatura
A. Azapagic & R. Clift	[21]	X	X		X		X				Producción mineral.
Aras Ahmadi & Ligia Tiruta-Barna	[22]	X	X			X		X			Plantas de producción Biotecnología
Di Zhang et al.	[23]	X	X		X			X			Producción de Calefactores
Chun Hsion Lim & Hon Loong Lam	[24]	X	X		X		X				Cadena de suministros
Joan Carreras et al.	[11]	X	X			X		X			Construcción civil
Shu San Gan et al.	[25]	X	X			X				X	Cadena de suministros

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Autor	Cita	Variables			Tipo de problema		Método de solución			Tema de estudio
		Económicas	Ambientales	Otras	Lineal	No lineal	Programación Entera	Heurística	E-Restricciones	
Nathan J. Ramadhan et al.	[26]	X		X		X	X			Cadena de suministros
James W. Levis et al.	[27]	X	X		X		X			Construcción civil y Manejo de residuos
Dimos Paraskevas et al.	[28]		X	X		X		X		Manejo de residuos
Claude-Emma Komly et al.	[12]		X	X		X		X		Manejo de residuos
Poonam Khanijo Ahluwalia & Arvind K. Nema	[29]	X	X	X		X	X			Manejo de residuos Electricos y electrónicos
Carl Vadenbo et al.	[30]		X	X		X	X			Manejo de residuos
S. Poulidikou et al.	[31]		X	X		X	X			Manejo de residuos
Eric Solano	[32]	X	X	X	X			X		Manejo de residuos
Farzad Dehghanian & Saeed Mansour	[33]	X	X	X		X		X		Cadena de suministros
Maria Joao Alves & Joao Clí'maco	[34]	X	X		X	X	X	X	X	Revisión de la literatura
Zhexuan Liu et al.	[35]	X	X	X	X				X	Cadena de suministros
Lidija Cucek et al.	[36]	X	X	X		X			X	Cadena de suministros

Tabla 5 Variables, tipo de modelo y metodología de solución. (Elaboración propia)

Los casos de estudio en los que se han utilizado integración de las herramientas LCA y 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

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

que son reemplazados por biocombustibles, la generación de residuos que son llevados al relleno sanitario, el reciclado y la reutilización de los residuos [13], [19], [24], [25], [26], [33], [35], [36].

Este tipo de integración (LCA 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 [15]. 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 [17], [23].

Entre los diversos usos encontrados para este tipo de integración se encuentran las enfocadas en la administración de los residuos: residuos de obras civiles, partes de vehículos que llegan a la etapa de Fin de vida, residuos de procesos metalúrgicos y de fabricación de botellas de plástico; que tienen como objetivo la minimización de residuos en el relleno y la maximización del uso de materiales reutilizables en los proceso productivos [11], [27], [28], [12], [30], [31], [32], [29], [14], [21].

El 40% de los artículos seleccionados coinciden en aclarar que el trabajo conjunto del análisis del ciclo de vida LCA y los modelos de optimización produce mejores resultados y permiten identificar diferentes alternativas de solución balanceando los diferentes objetivos económicos, de impacto ambiental y de impacto social. Sin embargo aclaran que las diferentes alternativas de solución encontradas se ajustan a condiciones específicas del sistema y por esto se deben usar la más compatible con el sistema a intervenir [21], [37], [23], [24].

Haciendo un análisis de lo anterior se encontró que el 37% de los modelos fueron planteados como modelo de programación lineal mientras que el 68% restante fueron planteados como modelos de programación no lineal, adicionalmente al evaluar los métodos de solución se encontró que la programación entera y las heurísticas corresponden a un 42% cada una y el 16% restante a otras metodología como E- restricciones, encontrando que no hay un método de solución predominante dentro de la literatura consultada.

La revisión de la literatura permite identificar en un principio los pasos a seguir para el análisis del ciclo de vida, teniendo en cuenta los balances de masa y energía dentro de las diferentes fases y como estas se relacionan entre sí, adicionalmente es una guía para el uso de las herramientas matemáticas permitiendo expresar las relaciones presentes en el ciclo de vida como un modelo de optimización que dé como resultado el uso óptimo de los recursos disponibles y potencialice las políticas propuestas por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], teniendo como objetivo la minimización del material que es enviado al relleno y el consumo de energía, garantizando la reincorporación del material reciclado al proceso productivo.

#### **3.2. Construcción del modelo de optimización.**

Una vez entendido el ciclo de vida para las luminarias en Bogotá propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] se construye y propone un modelo de optimización que describa el ciclo de vida de las

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

luminarias en Bogotá y en el cual se pueda observar el comportamiento de las políticas seleccionadas cuando se quiere minimizar la cantidad de material en el relleno o el consumo de energía durante el tiempo de planeación cumpliendo con el conjunto de restricciones. A continuación se describirán los supuestos y las condiciones de las políticas seleccionadas.

#### 3.2.1. Descripción de los supuestos y las condiciones del modelo

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, es por esto que se plantean los siguientes supuestos para el modelo de optimización propuesto.

- ❖ En el modelo de dinámica de sistemas propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], el valor de la variable tasa de incorporación ( $Tu$ ) representa el porcentaje de luminarias que salen de la fase de uso y son enviadas al proceso de reciclado por el canal formal, se calcula de la siguiente manera Figura 8:

```
Utilization_rate_formall = if
Landfill>Landfill_Capacity
then
1
else if
Contaminant_taxes>0
then
Porc_Reciclado+0.01*Count
else
Porc_Reciclado
```

Figura 8. Tasa de utilización  $Tu$ .

Tomado de *Product Policy Impact in the lifecycle of light bulbs.itm*

Debido a la variabilidad de  $Tu$  a lo largo del periodo de simulación 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, Ver Anexos. Para la validación de los diferentes escenarios de las políticas propuestas se tuvo en cuenta que el parámetro  $Tu$  cambia al modificar el valor de la variable **Base** que para este caso es **Porc\_Reciclado**, por el valor correspondiente en el que va a ser optimizado el modelo y observado el comportamiento de la política.

- ❖ En el modelo de dinámica de sistemas, el valor de la variable precio de la energía ( $Pre$ ) representa el valor por kilowatt/hora que se debe pagar en cada periodo de tiempo, el precio de la energía es calculado teniendo en cuenta la capacidad disponible del relleno sanitario y la capacidad de producir energía a partir de los desechos orgánicos, de la siguiente forma, Figura 9:

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

```
○ Energy_Cost = if Landfill>(Landfill_Capacity*0.5)
and
Landfill<(Landfill_Capacity*0.75)
then
(0.15*Count+357.23*(1+Incremento))*0.95
else if
Landfill>(Landfill_Capacity*0.75)
and
Landfill<(Landfill_Capacity)
then
(0.15*Count+357.23*(1+Incremento))*0.90
else if
Landfill>Landfill_Capacity
then
(0.15*Count+357.23*(1+Incremento))*0.85
else
(0.15*Count+357.23*(1+Incremento))
```

Figura 9. Precio de la energía (*Pre*).

Tomado de *Product Policy Impact in the lifecycle of light bulbs.itm*

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 en el modelo de optimización, suponiendo comportamientos iguales en los dos modelos. En la validación de los diferentes escenarios para la política de incremento en el precio de la energía, el parámetro *Pre* cambia al cambiar el valor de la variable **Base**, que para este caso seta **Incremento** en los valores en los que va a ser evaluada la política.

- ❖ La variable migración entre tecnologías *Ce* representa el porcentaje de las luminarias tipo *i* 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 *Ce* se hace a partir del hábito de uso. Sin embargo para el modelo de optimización *Ce* 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, lo que deja los porcentajes de migración entre tecnologías constantes para todo el periodo de análisis.
- ❖ En el modelo de dinámica de sistemas, el factor de daño de las luminarias que salen de la fase de uso *S* 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 dividida por el hábito de uso. Al suponer que el hábito de uso es constante y el comportamientos del sistema es el mismo, la variable *S* de dinámica de sistemas, ahora será un parámetro para el modelo de optimización y sus valores se toman de los resultados de iThink.

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

- ❖ Según la encuesta realizada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] la cantidad de horas que permanece encendida una luminaria al año es de 1800 horas en promedio, sin embargo Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] en su modelo de dinámica de sistemas plantea que este valor puede disminuir si el usuario nota un incremento en el valor de su factura y lo calcula de la siguiente forma, Figura 10:

```
○ Hora_Final_Halogen = if
  Total_consumption_halogen_1 < Base_power_price_halogen
  then
  Hours__of_use
  else if
  Total_consumption_halogen_1 > Base_power_price_halogen
  and
  Total_consumption_halogen_1 < (1.2 * Base_power_price_halogen)
  then
  Hours__of_use * 0.8
  else if
  Total_consumption_halogen_1 > (1.2 * Base_power_price_halogen)
  and
  Total_consumption_halogen_1 < (1.5 * Base_power_price_halogen)
  then
  Hours__of_use * 0.5
  else
  0.4 * Hours__of_use
```

Figura 10. Calculo de las horas de uso.

Tomado de *Product Policy Impact in the lifecycle of light bulbs.itm*

Debido a la variabilidad en las horas de uso para cada tipo de luminaria  $i$  en el modelo de dinámica de sistemas, se supone que los comportamientos son iguales y la variable *hora* se ingresa como un parámetro en el modelo de optimización para cada luminaria tipo  $i$  en cada periodo  $p$ , los valores son tomados de los resultados arrojados por iThink.

- ❖ Al igual que con las variables anteriores, el porcentaje de utilización  $Pu_{ip}$  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  $Pu_{ip}$  de dinámica de sistemas se ingresa como un parámetro en el modelo de optimización en términos de las luminarias tipo  $i$  para cada periodo  $p$ .

#### 3.2.2. Condiciones de la política de incorporación de material reciclado.

La política de incorporación de material reciclado planteada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] busca generar un descuento a los usuarios en el precio de las luminarias y a la vez incentivar a los productores y comercializadores a aumentar el número de luminarias que son recicladas a través del canal formal, en el cual se recupera el 70% de su peso, y al mismo tiempo disminuir la cantidad de luminarias que se van por el canal informal, en el cual se recupera solo el 30% del peso de la luminaria.

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Teniendo en cuenta el objetivo de la política los autores plantean 3 escenarios en los que aumentan el valor **Base** o porcentaje de luminarias que son recicladas por el canal formal ( $Tu$ ) en relación al descuento realizado en el precio de la luminaria de la siguiente forma:

	Tasa de Reincorporación	Descuento
<b>Escenario 1</b>	28%	13%
<b>Escenario 2</b>	48%	23%
<b>Escenario 3</b>	68%	33%

Tabla 6 Material Reincorporado al proceso productivo Vs. Descuento.  
Traducción realizada de Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

Cada uno de los escenarios planteados por la política es resuelto con el modelo de optimización cambiando el parámetro tasa de incorporación  $Tu$  por los valores especificados en la tabla, 28%, 48% y 68% respectivamente, manteniendo los otros parámetros iguales.

#### 3.2.3. Condiciones de la política de variación al precio de la energía.

La política de variación en el precio de la energía propuesta por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] pretende identificar el comportamiento del consumidor al momento de la compra de la luminaria y la migración a tecnologías más eficientes debido a los incrementos en el consumo. El uso de la política permite percibir un ahorro en el consumo de energía en el largo plazo al obligar al consumidor a migrar a tecnologías más eficientes. Para lograr el objetivo se plantean 4 escenarios en los que se aumenta el valor de la **Base** en 10%, 20%, 30% y 40% respectivamente, para cada escenario el parámetro **hora** tendrá un valor diferente debido a la relación que tiene con el precio de la energía, esto quiere decir que debe ser calculado en iThink y modificado en el modelo de optimización en cada uno de los escenarios.

#### 3.3. Formulación del modelo matemático para la fase de Fin de vida en el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá.

A continuación se hace la descripción del modelo de optimización de programación entera mixta, que representa el comportamiento del sistema propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] y que busca medir el impacto de las PPI seleccionadas, inicialmente se describen los conjuntos usados que permitirán identificar el tipo de luminaria, la forma de producción y el periodo de tiempo, a continuación se enuncian los parámetros o valores fijos del modelo, las variables de decisión, las funciones objetivo y el grupo de restricciones que aseguran el comportamiento del sistema.

##### 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  $i$ ); (1, 2, 3, 4, 5, 6)

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

#### Parámetros:

$Tu_p =$  Tasa de incorporación en el periodo  $p$ .

La tasa de incorporación corresponde al porcentaje del total de luminarias que salen de la fase de uso en el periodo  $p$  por daño y son recicladas por el canal formal.

$Pre_p =$  Precio de la energía en el periodo  $p$ .

El precio de la energía en el periodo  $p$  corresponde al precio por kilowatt hora que se debe pagar en cada periodo de tiempo  $p$ .

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

La potencia media de la luminaria tipo  $i$  corresponde al consumo promedio de energía de la luminaria tipo  $i$ .

$g_i =$  Peso de la luminaria tipo  $i$  en gramos

El peso de la luminaria tipo  $i$  corresponde al peso del tipo de luminaria más común en el mercado de las grandes superficies.

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

El porcentaje de salida de la fase de uso corresponde al porcentaje de daño de las luminarias, calculado como el valor entre la obsolescencia percibida y la obsolescencia programada para cada tipo de luminaria.

$TR_f =$  Tasa de reciclado formal = 0.7

La tasa de reciclado formal corresponde al porcentaje de material que se recupera del total de luminarias que se van por el canal formal y puede reincorporarse al proceso productivo para la fabricación de nuevas luminarias.

$TR_i =$  Tasa de reciclado informal = 0.3

La tasa de reciclado informal corresponde al porcentaje de material que se recupera del total de luminarias que se van por el canal informal y que se puede reincorporar al proceso productivo para la fabricación de nuevas luminarias.

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

La tasa de migración de luminarias corresponde al porcentaje del total de luminarias tipo  $i$  que migran a la mejor tecnología  $h$ .

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

El material reciclado en la fabricación de luminarias tipo  $i$  en el periodo  $p$  corresponde al porcentaje del total de material reciclado que se utilizara en la fabricación de una luminaria tipo  $i$  en cada periodo  $p$ .

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

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

Corresponde al número de unidades del tipo  $i$  que son fabricadas en producción nacional en cada periodo  $p$  con materia prima nueva.

$Hm_p$  = Cantidad de viviendas en el periodo  $p$

La cantidad de viviendas para cada periodo fue calculada a partir de los datos poblacionales proporcionados por la Secretaria Distrital de Planeación en el año 2011, multiplicarlos por el crecimiento poblacional esperado del 2.3% anual [38] y dividido por el número promedio de personas por hogar (4) según lo encontrado en la encuesta realizada por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], para los estratos 3 y 4 respectivamente.

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

La capacidad del relleno corresponde a la cantidad de gramos de residuos de luminarias que el relleno podría recibir. Esto fue calculado según la capacidad del relleno, la cantidad de toneladas esperadas de residuos eléctricos y electrónicos y el porcentaje de contribución de las luminarias en los residuos eléctricos y electrónicos [39].

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

El porcentaje de material reciclado corresponde a la cantidad de materia reciclado que puede ser usado para la fabricación de una luminaria nueva, esto quiere decir de del 100% del peso de la luminaria solo un 60% como máximo puede ser material reciclado.

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

Corresponde a la compra de luminarias de cada tipo en los hogares nuevos que ingresan al sistema en el periodo  $p$ .

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

El número de horas de uso de la luminaria tipo  $i$  en el periodo  $p$  corresponde a la cantidad de horas que se mantendrá encendida la luminaria tipo  $i$  en el periodo  $p$ .

#### **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 periodo  $p$ .

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

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

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

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

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

**$Nmpr_{i1p}$**  = 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  $p$ .

#### **Funciones Objetivo:**

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.

- i. Minimización del material en el relleno.

$$Min Z = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} [\{Tu * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_f)\} + \{(1 - Tu) * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_i)\}] \quad \text{Ecuación 11}$$

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.

- ii. Minimización del consumo de energía.

$$Min Z = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} C_{ijp} * PotMed_i * Pre_p * Hora_{ip} \quad \text{Ecuación 12}$$

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

#### **Sujeto a:**

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

$$ConEner_p = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 C_{ijp} * PotMed_i * Pre_p * Hora_{ip} \quad \forall p \quad \text{Ecuación 13}$$

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

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} = \sum_{j=i}^2 C_{ijp-1} - \sum_{j=1}^2 X_{ijp} + \sum_{j=1}^2 X_{ijp-1} * Ce_{ih} + \sum_{j=1}^2 X_{i-1jp-1} * Ce_{ih-1} + U_{ip} \quad \forall i; p; h \leq i \quad \text{Ecuación 14}$$

- 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  $p$ .

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} \geq \sum_{j=1}^2 X_{ijp} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 15}$$

- 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  $p$ .

$$\sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} \geq \sum_{j=1}^2 C_{ijp} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 16}$$

- 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  $p$ .

$$\sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} = Nmpn_{i1p} + Nmpr_{i1p} + Dimp_{i2p} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 17}$$

- 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  $p$ .

$$Nmpr_{i1p} = \sum_{j=1}^2 Mr_{ijp} * Pu_{ip} * \frac{1.60}{g_i} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 18}$$

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

$$\sum_{j=1}^2 Mr_{ijp} = \left\{ Tu * g_i * \sum_{j=1}^2 X_{ijp} * TR_f \right\} + \left\{ (1 - Tu) * g_i * \sum_{j=1}^2 X_{ijp} * TR_i \right\} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 19}$$

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

$$Dimp_{i2p} = 0.5 * (Nmpn_{i1p} + Nmpr_{i1p}) \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 20}$$

### 3. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

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

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} \leq \sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} \quad \forall i; p \quad \text{Ecuación 21}$$

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

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^6 C_{ijp} = Hm_p * 7 \quad \forall p \quad \text{Ecuación 22}$$

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

$$CapR \leq \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} \{Tu * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_f)\} + \{(1 - Tu) * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_l)\} \quad \text{Ecuación 23}$$

- 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  $p$ .

$$X_{ijp} \geq S_i * C_{ijp} \quad \forall i, j, p \quad \text{Ecuación 24}$$

El modelo planteado es un modelo de programación entera mixta con dos funciones objetivo independientes las cuales corresponden a cada una de las PPI seleccionadas, y un conjunto de 12 restricciones que pretenden describir el comportamiento del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá propuesto por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1].

#### 4. SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

#### 4. SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

El modelo de optimización propuesto es formulado como un problema de programación lineal entera, se resolvió con el software (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.

El modelo de optimización propuesto es resuelto para las dos PPI seleccionadas, cantidad de material reincorporado y aumento en el precio de la energía respectivamente. Para lograr el objetivo de cada política se resuelve el modelo con dos funciones objetivo, una para cada política, la primera minimizan la cantidad de material que es enviado al relleno sanitario, y la segunda minimiza el consumo de energía.

##### 4.1. Validación del modelo

Para la validación del modelo de optimización se plantearon escenario extremos para cada una de las variables de interés, permitiendo observar el comportamiento de las mismas. Los escenarios planteados y los resultados se muestran a continuación:

##### 4.1.1. Variable material reciclado

Para esta variable se plantearon dos escenarios en los que el precio de la energía mantuvo su base constante en \$ 357.23, mientras que el valor base de la tasa de incorporación  $Tu$  tomó los valores de 1% y 90% respectivamente, los resultados y el porcentaje de mejora para las variables de interés se muestran a continuación:

Variable de interés	Tu = 0.01	Tu = 0.9	% de Variación
Consumo Energía (Pesos)	5.22E+12	5.18E+12	0.8%
Cantidad en el relleno (Gramos)	9.04E+09	5.71E+09	37%
Material Reciclado (Gramos)	8.73E+09	1.19E+10	37%

Tabla 7 Validación política incorporación material reciclado. (Elaboración propia)

Al resolver el modelo en cada uno de los dos escenarios y comparar sus resultados, se observa una variación significativa al cambiar los valores **Base** para la variable  $Tu$  de 1 % a 90%, permitiendo identificar sensibilidad en el modelo propuesto frente a los escenarios planteados. En cuanto a los resultados obtenidos se evidencia una reducción del 37% en cuanto a la cantidad de material enviado al relleno y el material reciclado respectivamente, mientras que para el consumo de energía se evidencia una variación del 0.8% lo que representa aproximadamente un ahorro de 43 millones en un periodo de 50 años.

##### 4.1.2. Variable precio de la energía

Para la validación de modelo en relación a la variable precio de la energía se plantean dos escenarios, el primero es la condición actual del sistema, esto quiere decir que se tiene un valor **Base** para el precio de la energía de 357.23, mientras que para el segundo escenario se incrementa el precio de la energía en un 90% llegando a tener un valor **Base** de 678.73, para los dos escenarios de validación el valor de la variable tasa de incorporación  $Tu$  tendrá un valor contante de 8%. Los resultados obtenidos al resolver el modelo para cada escenario propuesto son:

#### 4. SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

Variable de interés	Pre. Base =357.23	Pre. Base = 678.73	% de Variación
Consumo Energía (Pesos)	5.82E+12	7.57E+12	30%
Cantidad en el relleno (Gramos)	2.56E+10	1.82E+10	-29%
Material Reciclado (Gramos)	3.26E+10	2.19E+10	-33%

Tabla 8 Validación política variación del precio de la energía. (Elaboración propia)

Los resultados del modelo para los dos escenarios de validación planteados permiten observar un incremento del 30% en la variable consumo de energía, observando una sensibilidad en el modelo al cambiar parámetros de interés, adicionalmente se evidencia una disminución en la cantidad de material en el relleno y en la cantidad de material reciclado, del 29% y 33% respectivamente, esto puede ser resultado de una disminución en la cantidad de luminarias menos eficientes y de mayor rotación y un aumento en las luminarias de mayor eficiencia y menor rotación.

La validación del modelo para cada una de las variables de interés y para cada una de las funciones objetivo que las representa, demuestra que las variaciones extremas en los parámetros de entrada, generan grandes variaciones en los resultados evidenciando que el modelo de optimización es sensible a los cambios y puede llegar a representar el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá.

#### 4.2. Análisis de resultados

El análisis de resultados presenta en primer lugar la evaluación de cada uno de los escenarios para cada política y una comparación de dichos escenarios con el estado actual del sistema, en segundo lugar se trata de comparar los resultados de dinámica de sistemas con los de optimización teniendo en cuenta que dinámica de sistemas tiene como objetivo la descripción del comportamiento del sistema y los modelos de optimización tienen como objetivo trazar un plan de trabajo con los recursos disponibles del sistema en función de cumplir sus metas.

##### 4.2.1. Resultados del modelo de optimización

Al evaluar la política de incorporación de material reciclado en los tres escenarios planteados por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], incremento del parámetro tasa de incorporación  $Tu$  en el valor **Base** a 0.28, 0.48 y 0.68 respectivamente, y compararlos con el modelo actual donde el valor **Base** es de 0.08 se encuentra que los porcentajes de variación entre los dos escenarios para las variables de interés son los siguientes:

Variable Interés	0.08 Vs 0.28	0.08 Vs 0.48	0.08 Vs 0.68
Consumo Energía (Pesos)	10%	10%	10%
Cantidad en el relleno (Gramos)	33%	29%	25%
Material Reciclado (Gramos)	29%	32%	35%

Tabla 9. Porcentaje de variación de la política incorporación de material reciclado para cada escenario. (Elaboración propia)

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, se evidencia una reducción en su valor en comparación con el estado actual del sistema, mientras que para la variable material reciclado en relación a la situación actual del sistema se evidencia un aumento, pues se aprovecha cada vez más el material, esto quiere decir que el material en relleno se reduce en un 29% y el material reciclado se aumenta en un 32% en comparación con la situación actual del

#### 4. SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

sistema para el primer escenario de la política, mientras que para el ultimo escenario de la política 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, Rodríguez. LA. et al. (2015) [1] plantea cuatro escenarios haciendo un incremento del 10%, 20%, 30% y 40% a la variable precio de la energía *Pre* que tiene un valor *Base* de 357.23. Para que el modelo se comporte en concordancia con el sistema en cada sub-modelo que representa un escenario los parámetros porcentaje de utilización  $Pu_{ip}$  y las horas de uso *Hora* del modelo de optimización deben ser actualizados con los resultados de iThink para cada simulación de escenario. Al realizar el análisis se obtienen los siguientes resultados:

Variable Interés	Pre= 392.95	Pre = 428.67	Pre = 464.39	Pre = 500.12
Consumo Energía (Pesos)	18%	13%	7%	1%
Cantidad en el relleno (Gramos)	22%	22%	22%	22%
Material Reciclado (Gramos)	28%	28%	28%	28%

Tabla 10 Porcentaje de variación de la política variación del precio de la energía para cada escenario. (Elaboración propia)

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 1.048 billones de pesos, 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 45.058 millones de pesos. Esto evidencia que la política enfocada a la minimización del consumo de energía no genera el impacto esperado en términos de ahorros en el consumo de energía, pues al aumentar el precio de la energía el consumo total al final de los 50 años es similar al consumo sin el uso de políticas. 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. La Figura 11 muestra las curvas de ahorro por periodo para cada escenario.

#### 4. SOLUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.

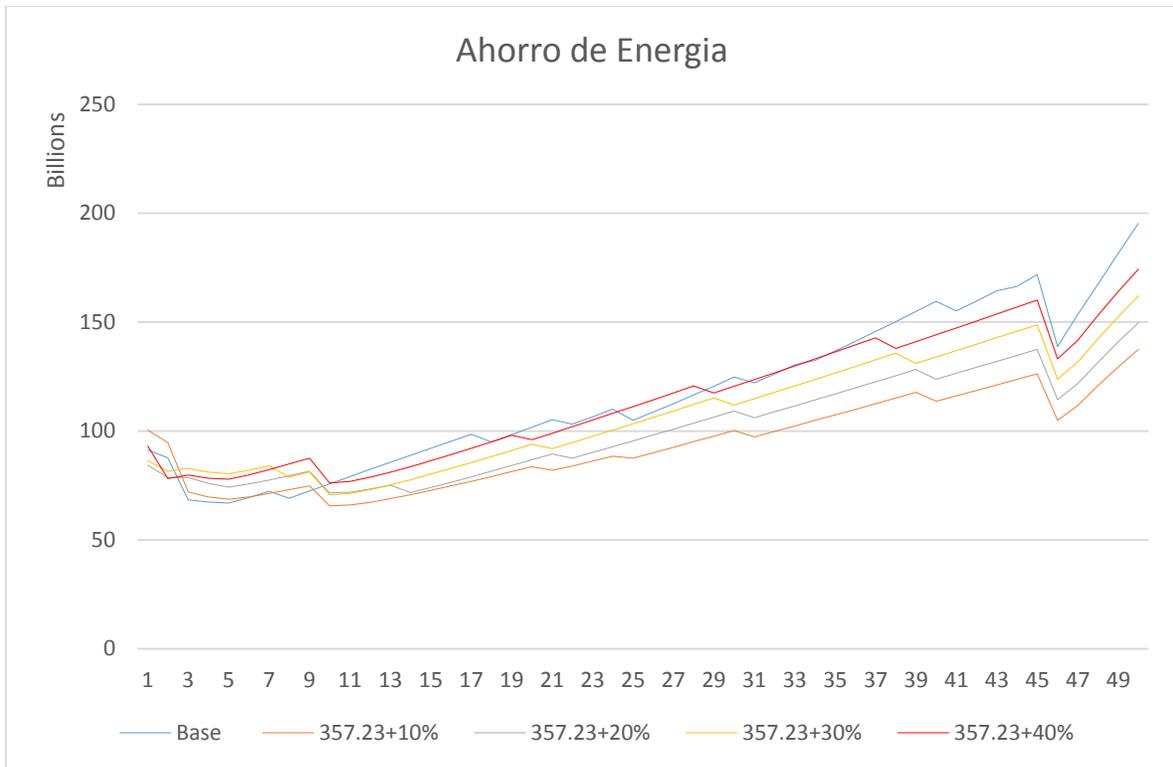


Figura 11 Ahorro de energía para la política incremento en el precio. (Elaboración propia)

Al evaluar los resultados de las dos políticas se hace evidente que la política incorporación de material reciclado por tener un objetivo encaminado a minimizar el material enviado al relleno sanitario controla la cantidad de luminarias en el sistema, sin dejar de satisfacer la demanda, mientras que la política variación del precio de la energía enfoca su objetivo en la minimización del consumo de energía haciendo una migración más rápida hacia las luminarias con mayor eficiencia.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

### 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

Dinámica de sistemas es una herramienta que permite la interpretación y descripción de sistemas complejos mediante la construcción de modelos de simulación en donde se expresan las relaciones existentes entre los diferentes componentes del sistema, teniendo como objetivo el análisis del comportamiento y sus relaciones a lo largo de un periodo de tiempo [40] [41]. Mientras que los modelos de optimización son la herramienta que permite la representación de un problema o sistema, teniendo como objetivo encontrar los valores de las variables de interés que proporcionen los mejores resultados, minimización o maximización según el objetivo buscado, bajo un conjunto de parámetros que deben ser respetados [42] [43].

Teniendo en cuenta el enfoque de cada una de las herramientas utilizadas, se identifican las fortalezas y debilidades de cada una de ellas, encontrando que Dinámica de sistemas permite la descripción del dinamismo del sistema que estudio, mientras que los modelos de optimización son exactos y estricto al describir sus relaciones. Así mismo los modelos de optimización permiten plantear objetivos sobre las variables de interés teniendo como resultado el plan de acción que permite cumplir el objetivo, mientras que Dinámica de sistemas permite entender el comportamiento de la variable de interés y su objetivo está encaminado al entendimiento del comportamiento del sistema.

En términos generales es imposible realizar una comparación directa de los resultados obtenidos por dinámica de sistemas con los obtenidos por el modelo de optimización, debido a la naturaleza de cada una de las herramientas, es por esto que se va a presentar un paralelo entre los resultados obtenidos por cada uno de los métodos, intentando complementar y potencializar las PPI que son objeto de estudio.

Para realizar este paralelo es indispensable conocer los valores obtenidos por cada una de las políticas en las condiciones actuales del sistema, la Tabla 11 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 en donde FO1. Corresponde a la minimización del material enviado al relleno sanitario y FO2. A la minimización del consumo de energía.

	FO. 1	FO. 2	DS
Material en relleno (Ton.)	8.760	23.300	4,4243
Material Reciclado (Ton.)	8.880	19.800	337,45
Consumo de energia (kw)	5,18 Billones	4,7 Billones	170 Billones

Tabla 11. Resultados para el estado actual del sistema en cada una de las dos herramientas. (Elaboración propia)

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.

Material reciclado	Dinámica de sistemas	Optimización	incremento
Escenario 1 Tu = 0.28	4.80E+06	9.40E+09	99.95%
Escenario 2 Tu = 0.48	5.39E+06	1.04E+10	99.95%
Escenario 3 Tu = 0.68	6.06E+06	1.13E+10	99.95%

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

Tabla 12. Confrontación de resultados política 1 material reciclado. (Elaboración propia)

En cuanto al material reciclado para la política incremento del material reciclado, la Figura 12 muestra los resultados obtenidos mediante dinámica de sistemas representada por el eje vertical de la izquierda, Vs los resultados obtenidos para esta variable mediante el modelo de optimización, representado por el eje vertical derecho, para cada uno de los 50 años contemplados como el periodos de planeación. En la Figura 12 se observa que el comportamiento de las dos herramientas es similar sin embargo los valores logrados por cada una son muy diferentes.

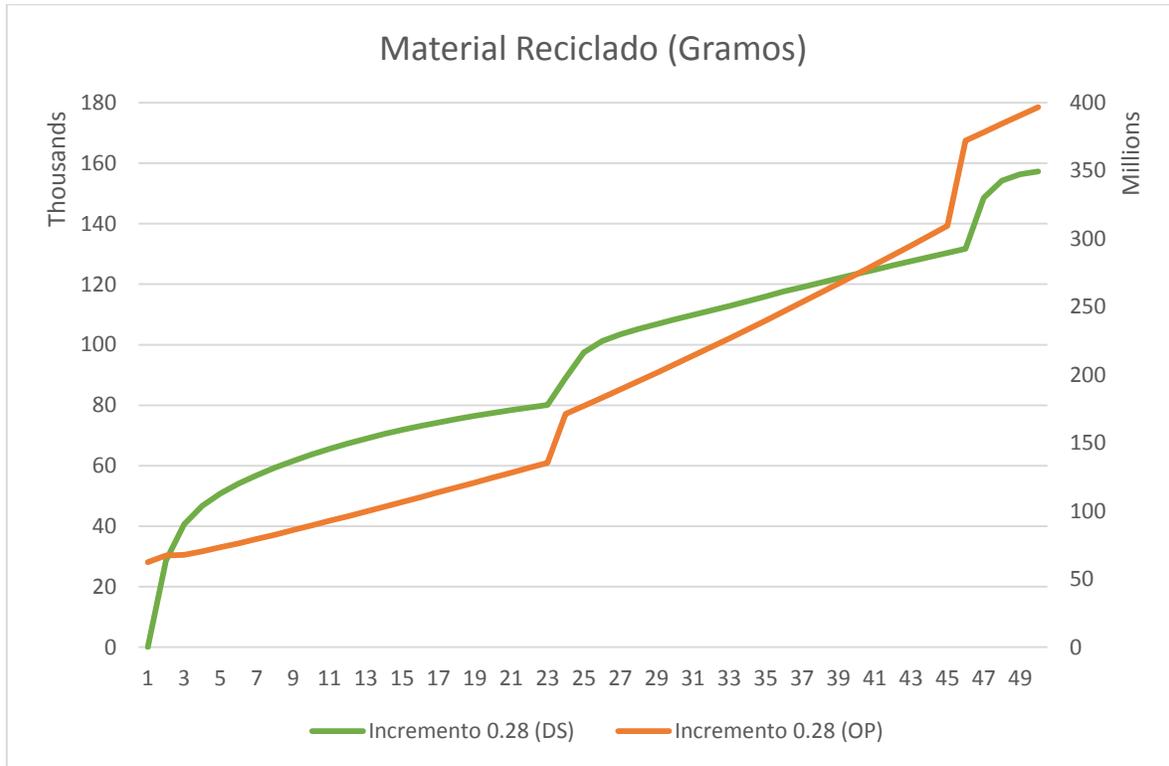


Figura 12. Material Reciclado política 1. (Elaboración propia)

En cuanto al consumo de energía para la política incremento del material reciclado la Tabla 13 muestra los resultados para cada uno de los escenarios planteados, y la Figura 13 muestra el comportamiento de las herramientas en uno de los escenarios, sin embargo se puede ver que la línea que representa los resultados de la herramienta dinámica de sistemas está por debajo de la línea que representa los resultados del modelo de optimización, teniendo en cuenta que estos valores son mayores, esto se debe a que la escala de los ejes utilizada para observar el comportamiento de cada una de las herramientas es diferente, donde el eje vertical derecho representa el modelo de optimización y el eje vertical izquierdo el modelo de dinámica de sistemas.

Consumo energía	Dinámica de sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1 Tu = 0.28	1.70E+14	5.18E+12	97%
Escenario 2 Tu = 0.48	1.70E+14	5.18E+12	97%
Escenario 3 Tu = 0.68	1.70E+14	5.18E+12	97%

Tabla 13. Confrontación de resultados política 1 Consumo de energía. (Elaboración propia)

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

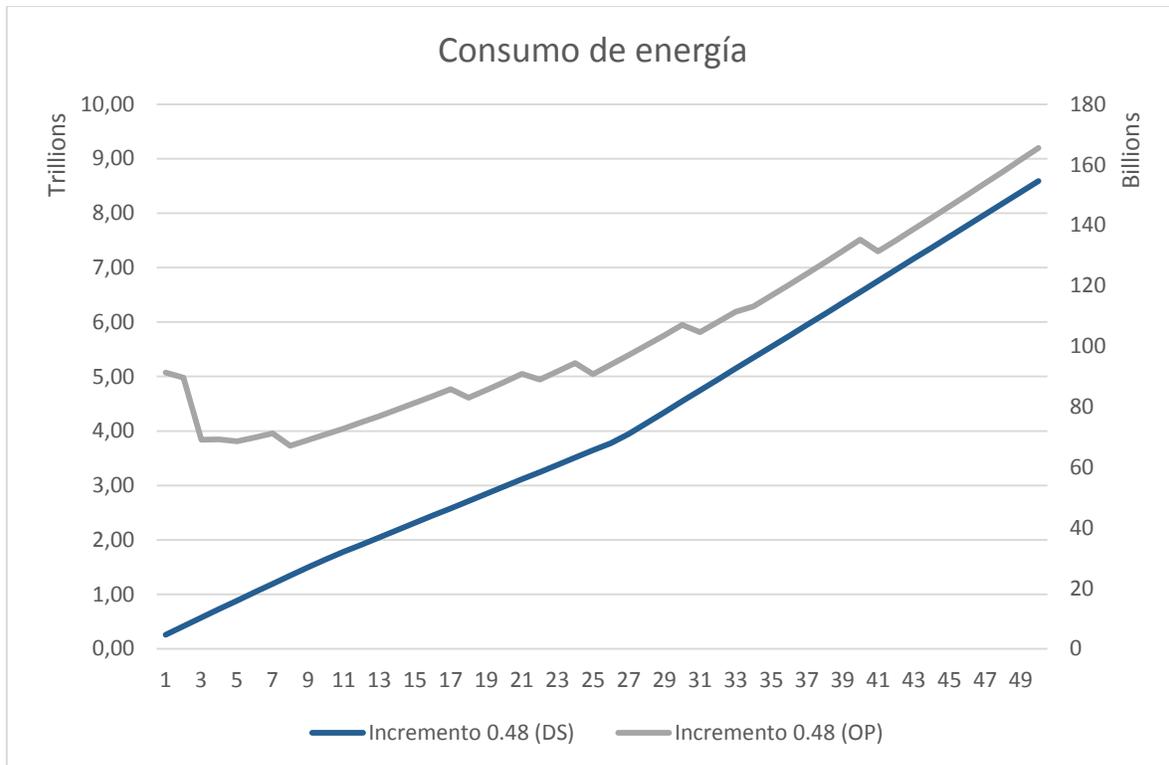


Figura 13. Consumo de energía, política 1. (Elaboración propia).

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 6 muestra las luminarias Incandescente, Halógena, Led y Tubular Led en uso para el escenario 2 ( $Tu = 0.48$ ) en cada periodo de tiempo y para cada herramienta. En la Figura 14 se puede ver la rápida migración a tecnologías más eficientes por parte del modelos planteados, en donde dinámica de sistemas evidencia una migración más lenta mientras que el modelo de optimización realiza una migración rápida en los primeros años.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

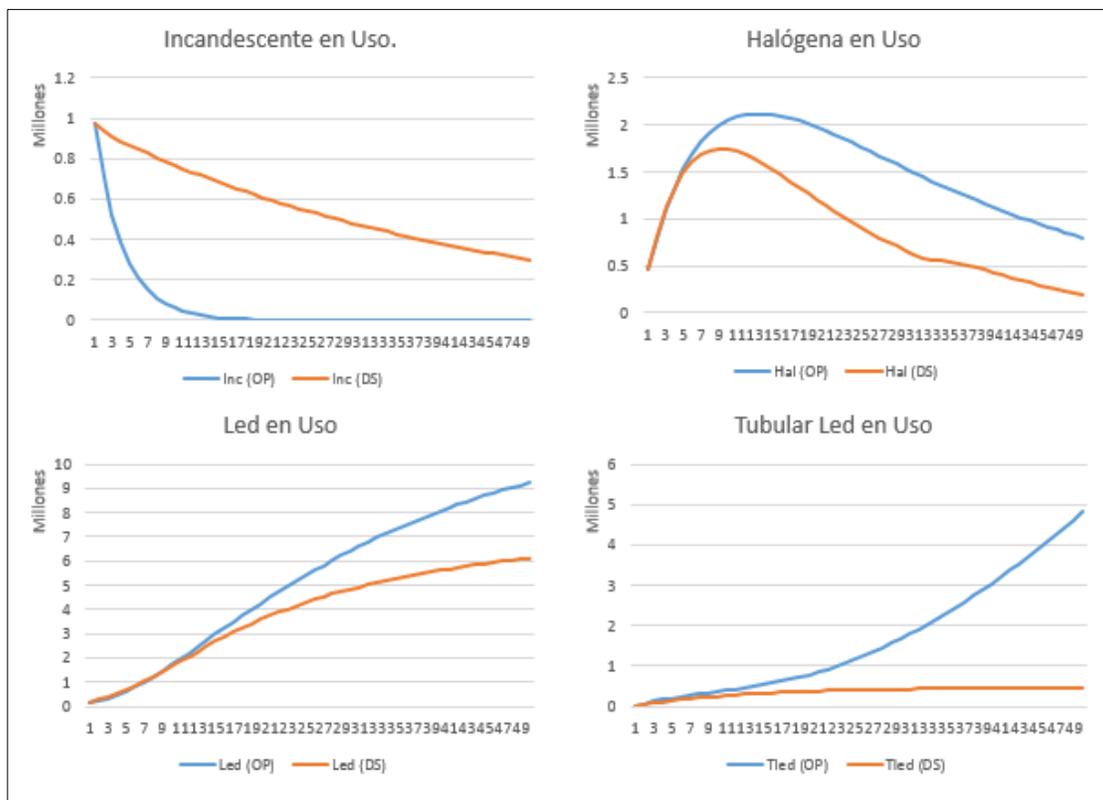


Figura 14. Migración de Luminarias política 1. (Elaboración propia)

En cuanto a la variable material en relleno para la política 1, la Tabla 14 presenta los resultados obtenidos por cada una de las herramientas, dejando ver que la reducción potencial en cada escenario logrado con el modelo de optimización, así mismo que la Figura 15 muestra el comportamiento de cada una de las herramientas, sin embargo la línea que representa los resultados de dinámica de sistemas se encuentra por debajo de los resultados obtenidos con optimización, esto se debe a los valores de los ejes que los representan. Se puede evidenciar el comportamiento de la variable material en relleno para el escenario 3 ( $Tu = 0.68$ ) 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.

Material en relleno	Dinámica de sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1 $Tu = 0.28$	2.34E+11	8.24E+09	96%
Escenario 2 $Tu = 0.48$	2.03E+11	7.20E+09	96%
Escenario 3 $Tu = 0.68$	1.75E+11	6.31E+09	96%

Tabla 14. Confrontación de resultados política 1 Material en Relleno. (Elaboración propia)

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

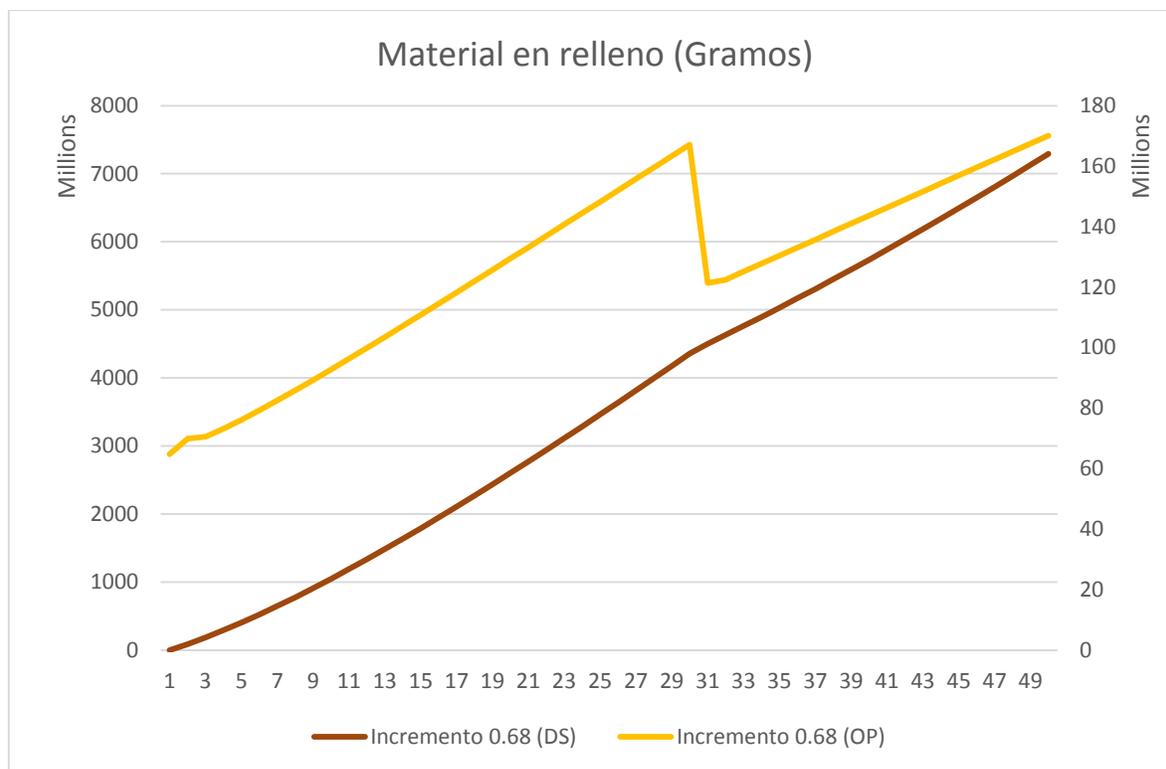


Figura 15. Material en Relleno política 1. (Elaboración propia)

Como se observa en los valores de las Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 el uso de modelos de optimización pueden proporcionar un incremento o reducción significativos en las variables de interés, esto quiere decir que dinámica de sistemas es una herramienta adecuada para describir el comportamiento de sistemas complejos, bajo la influencia de PPI, permitiendo entender las relaciones del ciclo de vida de los productos en cada fase y entre las fases.

En segundo lugar se confrontaran 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 15 se observan los valores resultantes y el porcentaje de incremento para la variable material reciclado en cada uno de los escenarios propuestos.

Material reciclado	Dinámica de sistemas	Optimización	incremento
Escenario 1 Pre = 357.23+10%	4.33E+06	2.33E+10	99.98%
Escenario 2 Pre = 357.23+20%	4.40E+06	2.33E+10	99.98%
Escenario 3 Pre = 357.23+30%	4.40E+06	2.33E+10	99.98%
Escenario 4 Pre = 357.23+40%	4.58E+06	2.33E+10	99.98%

Tabla 15. Confrontación de resultados política 2 material reciclado. (Elaboración propia)

La Figura 16 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.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

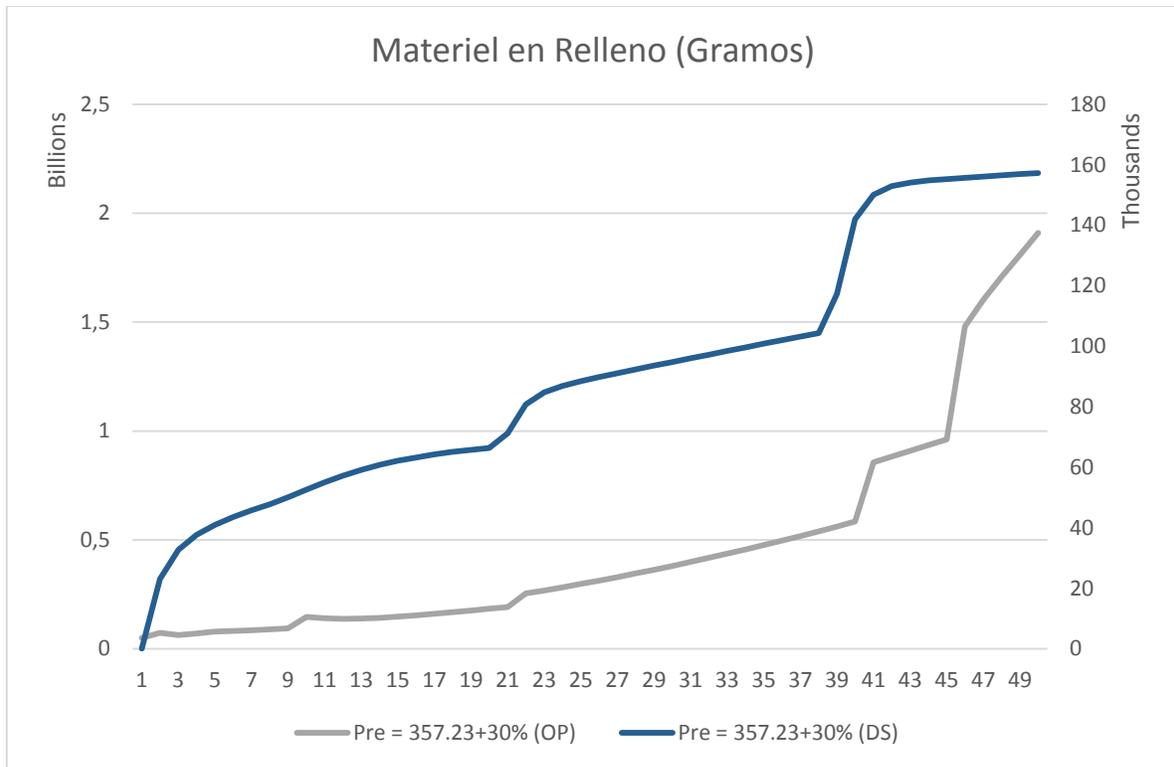


Figura 16. Cantidad de material reciclado política 2. (Elaboración propia)

En cuanto al material enviado al relleno sanitario por parte de la política 2, incremento en el precio de la energía, la Tabla 16 muestra los valores y el porcentaje de reducción encontrados con cada una de las herramientas para cada uno de los escenarios propuestos.

Material en relleno	Dinámica de sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1 Pre = 357.23+10%	2.64E+11	1.98E+10	92%
Escenario 2 Pre = 357.23+20%	2.66E+11	1.98E+10	93%
Escenario 3 Pre = 357.23+30%	2.66E+11	1.98E+10	93%
Escenario 4 Pre = 357.23+40%	2.79E+11	1.98E+10	93%

Tabla 16. Confrontación de resultados política 2 material en relleno. (Elaboración propia)

La Figura 17 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.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

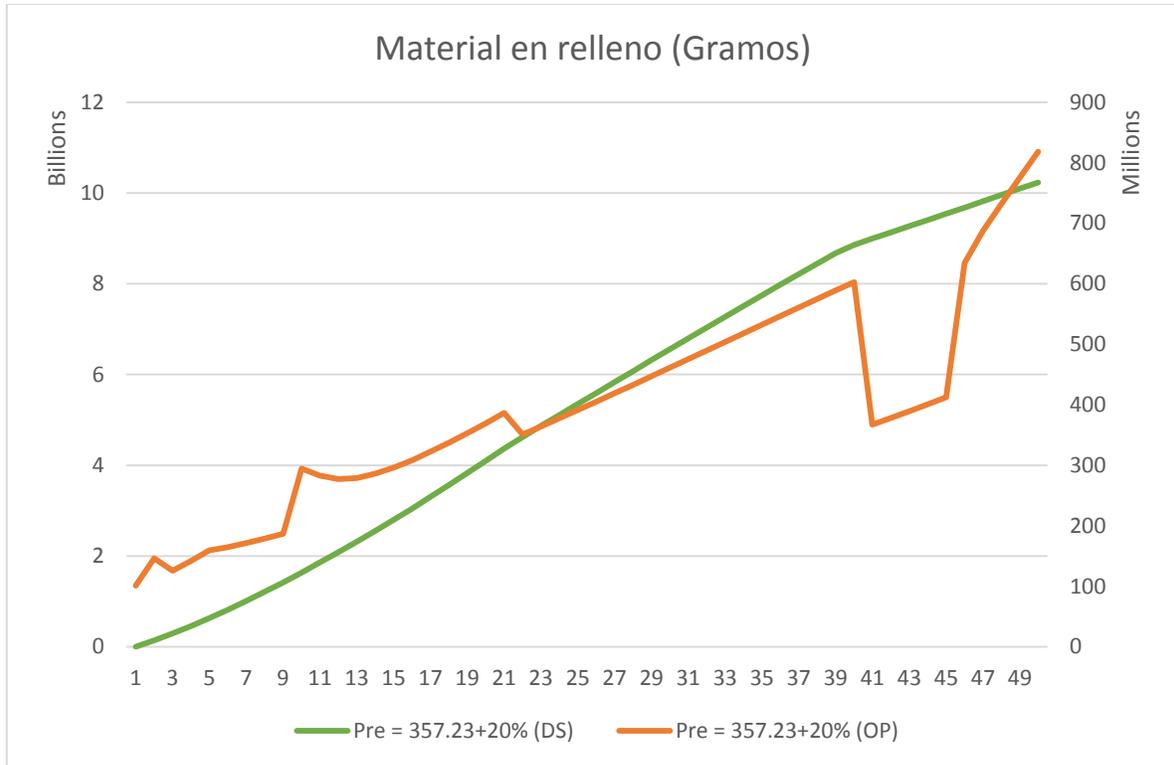


Figura 17. Cantidad de Material en relleno política 2. (Elaboración propia)

La última variable de interés es el consumo de energía, la Tabla 17 muestra el comportamiento de esta variable y el porcentaje de reducción para los cuatro escenarios planteado.

Consumo energía	Dinámica de sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1 Pre = 357.23+10%	4.36E+14	4.70E+12	99%
Escenario 2 Pre = 357.23+20%	4.36E+14	5.02E+12	99%
Escenario 3 Pre = 357.23+30%	4.37E+14	5.36E+12	99%
Escenario 4 Pre = 357.23+40%	4.36E+14	5.70E+12	99%

Tabla 17. Confrontación de resultados política 2 consumo de energía. (Elaboración propia)

Al evaluar el comportamiento del consumo de la energía para las dos herramientas se evidencia que no existe una variación significativa entre los diferentes escenarios, esto quiere decir que para dinámica de sistemas el consumo total al final de los 50 años de planeación en los 4 escenarios es el mismo y no se evidencia ningún ahorro o disminución en el consumo total, esto mismo ocurre para el modelo de optimización. La Figura 18 muestra el comportamiento de la variable consumo de energía para el escenario 1 ( $Pre = 357.23+10\%$ ) 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.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

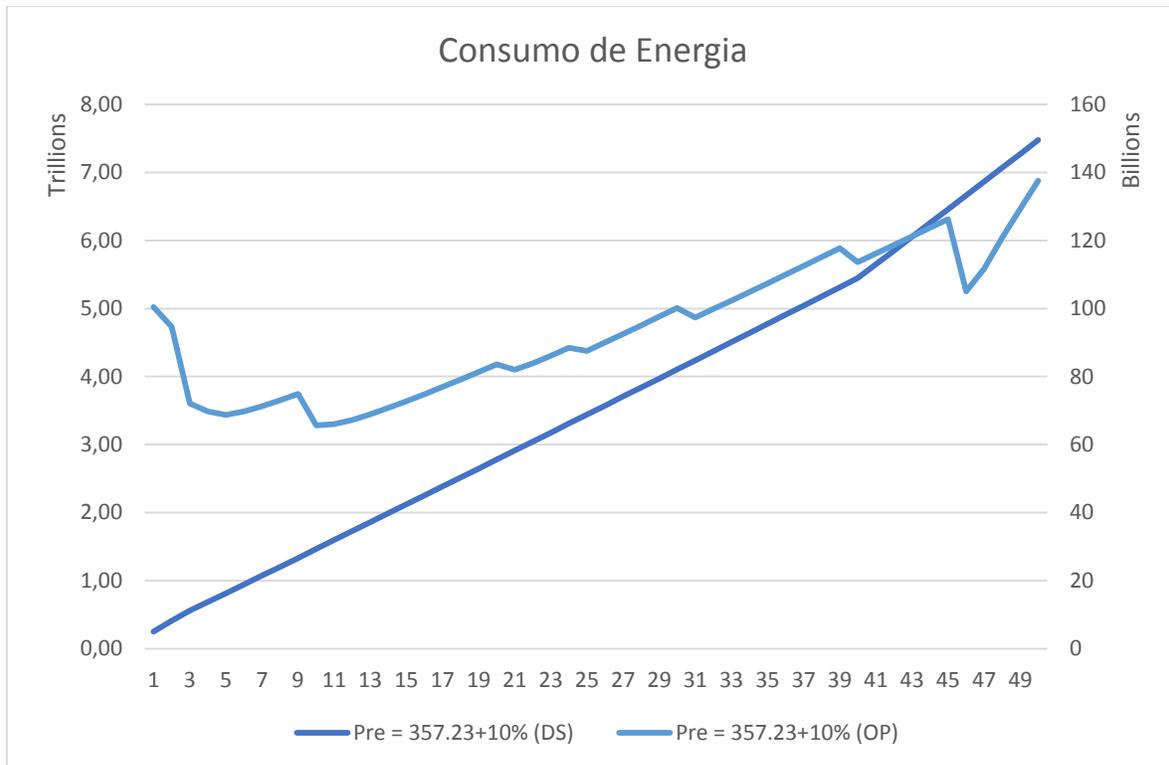


Figura 18. Consumo de energía política 2. (Elaboración propia)

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 19 muestra el número de luminarias Incandescente, Halógena, Led y Tubular Led, en uso para cada uno de las herramientas. En la gráfica se observa que para el modelo de optimización la migración de luminarias menos eficientes, incandescente, se realiza en los primeros 13 o 14 años, mientras que para dinámica de sistemas al final de los 50 años todavía hay luminarias de este tipo en el sistema. Por otro lado las luminarias halógenas presentan un incremento significativo en las dos herramientas pero para dinámica de sistemas su uso es prolongado, mientras que para optimización su consumo disminuye drásticamente en el periodo 10, en cuanto a las luminarias más eficientes, Led y tubular led, su uso se hace incrementa significativamente a medida que las luminarias menos eficientes dejan de ser usadas. Es importante considerar este tipo de comportamientos y resultados de las variables de interés para el rediseño de las PPI, ya que se pueden lograr impactos significativos en el uso de los recursos y en la disminución de contaminantes.

## 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DINAMICA DE SISTEMAS OPTIMIZACIÓN.

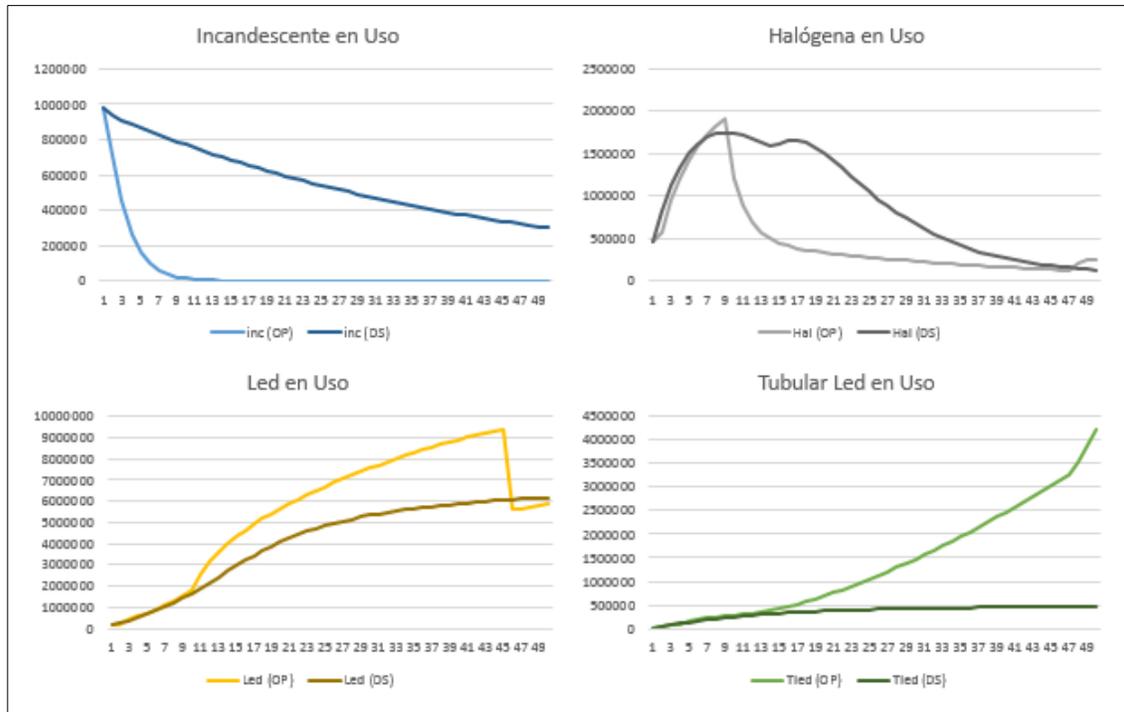


Figura 19. Migración de Luminarias política 2. (Elaboración propia)

Al igual que en la política anterior se puede observar un incremento y una reducción en los valores de las variables de interés, sin llegar a concluir que los modelos de optimización son una buena herramienta para la construcción de PPI, sin embargo los resultados obtenidos por el modelo de optimización pueden contribuir al rediseño de las PPI haciéndolas más estrictas, contribuyendo a la reducción del contaminante y al incremento del uso del material reciclado en el proceso productivo.

Al observar los resultados obtenidos por cada una de las herramientas y la comparación de estos, se puede observar claramente el propósito de cada una, Dinámica de sistemas se limita a describir el comportamiento del sistema bajo la influencia de cada una de las políticas de gestión integrada, mientras que el modelo de optimización realiza la asignación de recursos en función de encontrar los valores adecuados que garanticen el objetivo que busca la implementación de cada política. Sin embargo la descripción y entendimiento de las relaciones existentes entre las variables del sistema proporcionado por Dinamia de sistemas son el insumo perfecto para la construcción del modelo de optimización que tiene permita medir el impacto de las PPI que son objeto de estudio, permitiendo que las políticas diseñadas estén soportadas por un plan de acción que permita tomar mejores decisiones en cuanto a las PPI que deben ser implementadas.

### 6. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

Teniendo en cuenta el desarrollo de la investigación que inicio con la descripción del modelo de dinámica de sistemas y las PPI propuestas por Rodríguez. LA. et al. (2015) [1], seguido de la recolección de la información, construcción del estado del arte y del modelo de programación entera mixta y finalmente presentando la solución del modelo propuesto y la comparación de las herramientas usadas, se presentan las siguientes conclusiones:

- i. El modelo matemático que permite medir el impacto de las PPI, aplicadas a la fase de fin de vida de las luminarias en Bogotá es un modelo de Programación Entera Mixta que contempla las interacciones del sistema como restricciones y permite la generación de bucles al incluir el material reciclado en los proceso de producción, apuntándole a la minimización del material enviado al relleno al solucionar el modelo para la primera función objetivo y minimizando el consumo de energía al solucionar el modelo para la segunda función objetivo.
- ii. Se considera dinámica de sistema como una herramienta adecuada para la descripción de sistemas dinámicos y ciclos de vida, ya que permite entender las relaciones existentes entre las diferentes fases del ciclo de vida de los productos, y comprender el comportamiento de las variables de interés y el dinamismo del sistema bajo la influencia de políticas, siendo el punto de partida para la construcción del modelo de optimización, brindando las ecuaciones de balance del sistema, permitiendo describir de manera precisa el sistema evitando realizar supuestos, como el comportamiento de los consumidores o la cantidad de horas que permanece encendida las luminarias dependiendo del consumo de energía.
- iii. Las PPI seleccionadas son la incorporación de material reciclado y la variación del precio de la energía, ya que generan los mejores resultados para las variables de interés: material reciclado y consumo de energía; al comparar los resultados del estado actual del sistema con los resultados obtenidos al resolver los modelos bajo la influencia de las políticas se tiene que 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 al comparar los resultados obtenidos del estado actual del sistema y compararlos con los resultados obtenidos bajo la influencia de políticas, los porcentajes de mejora son del 37% y 30% respectivamente.
- iv. Al realizar la comparación de resultados de las dos herramientas usadas se puede evidenciar que el modelo de optimización realizar 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%, siempre y cuando se resuelva el modelo con la función objetivo que garantiza que se envíe la menor cantidad de material al relleno sanitario, mientras que para lograr una asignación de recursos que minimice el consumo de energía en un 98%, debe resolverse el modelo con la función objeto que garantiza el menor consumo.

## 6. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

- v. Por la naturaleza de las herramientas, no es posible realizar una comparación directa entre dinámica de sistemas y optimización, debido que dinámica de sistemas está enfocada en la descripción del comportamiento de los sistemas, mientras que los modelo 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, estas pueden ser el punto de partida para la construcción de los modelos de optimización más reales, y para el rediseño de PPI's más estrictas logrando resultados benéficos para el medio ambiente en el mediano plazo.
- vi. 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 buenas soluciones e incrementos en el material reciclado y disminución en el consumo de energía y el material enviado al relleno.
- vii. Los modelos de optimización construidos a partir de los modelos de dinámica de sistemas permiten generar relaciones consecuentes para el sistema, sin embargo los modelos lineales no permiten la flexibilidad de los modelos de dinámica de sistemas, haciendo de los resultados obtenidos por optimización sean una fotografía de un instantes de tiempo bajo circunstancias iguales, mientras que los modelos de dinámica de sistemas permiten observarlos cambios en el comportamiento del mismo a lo largo de todo el periodo de simulación.
- viii. 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 rápida migración en las dos herramientas.
- ix. 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.
- x. La integración de herramientas que permitan describir los ciclos de vida de los productos y los modelos de optimización son usados 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.

En cuanto a estudios futuros, es de interés realizar modificaciones al modelo de optimización propuesto con el fin de eliminar los supuestos sobre la tasa de incorporación  $Tu$ , el precio de la

## 6. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

energía  $P_{re}$  y el porcentaje de utilización  $Pu_{ip}$ , 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.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. A. Rodríguez, S. Jaimes, E. Estupiñán, and D. Toro, "PRODUCT POLICY IMPACT IN THE LIFECYCLE OF LIGHT BULBS THROUGH SYSTEMS DYNAMICS," no. 1, p. 20, 2015.
- [2] Industria Argentina, "Unidad de Medio Ambiente Análisis de Ciclo de Vida," 2011.
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "Ntc-Iso 14040," no. 571, pp. 1–18, 2007.
- [4] A. y M. A. Ministerio de Agricultura, "¿Qué son los residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)," 2015. .
- [5] European Lamp Companies Federation, "Did you know ... .. the potential energy savings of an energy efficient lamp?," *Energy*.
- [6] J. C. Carrá, "Pensamiento Sistémico con IThink," 2008.
- [7] D. Kalenatic, L. H. M. Méndez, K. V. M. Valbuena, and L. J. G. Rodríguez, "Metodología de planeación logística basada en gestión de proyectos y dinámica de sistemas en empresas prestadoras de servicios," *Rev. Fac. Ing.*, no. 58, pp. 208–218, 2011.
- [8] Comisión de las Comunidades Europeas, *Libro Verde Sobre Políticas de Productos integrada*, vol. 2001–68. Bruselas, 2001, p. 34.
- [9] V. Y. D. T. Ministerio de Ambiente, *Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. 2010.
- [10] a Azapagic, "Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation," *Chem. Eng. J.*, vol. 73, no. 1, pp. 1–21, 1999.
- [11] J. Carreras, D. Boer, G. Guillén-Gosálbez, L. F. Cabeza, M. Medrano, and L. Jiménez, "Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact," *Energy Build.*, vol. 88, pp. 335–346, 2015.
- [12] C.-E. Komly, C. Azzaro-Pantel, A. Hubert, L. Pibouleau, and V. Archambault, "Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 66–81, 2012.
- [13] Z. Liu, T. Qiu, and B. Chen, "A LCA based biofuel supply chain analysis framework," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 6, pp. 669–681, 2014.
- [14] L.-F. Morales Mendoza, M. Boix, C. Azzaro-Pantel, L. Montastruc, and S. Domenech, *Biodiesel Production from Waste Vegetable Oils: Combining Process Modelling, Multiobjective Optimization and Life Cycle Assessment (LCA)*, vol. 33. Elsevier, 2014.
- [15] B. Khoshnevisan, E. Bolandnazar, S. Shamshirband, H. M. Shariati, N. B. Anuar, and M. L. Mat Kiah, "Decreasing environmental impacts of cropping systems using life cycle assessment (LCA) and multi-objective genetic algorithm," *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 67–77, 2015.
- [16] R. Brunef, K. S. Kumar, G. Guillen-Gosalbez, and L. Jimenez, "Integrating process simulation, multi-objective optimization and LCA for the development of sustainable processes. application to biotechnological plants," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 29, pp. 1271–1275, 2011.
- [17] J. Wang, Y. Yang, T. Mao, J. Sui, and H. Jin, "Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system," *Appl. Energy*, vol. 146, pp. 38–52, 2015.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [18] P. Martínez and A. M. Eliceche, *Multi Objective Optimization Using Life Cycle Environmental Impact and Cost in the Operation of Utility Plants*, vol. 27, no. 1999. Elsevier Inc., 2009.
- [19] A. Kostin, F. D. Mele, and G. Guillén-Gozálbez, "Multi-objective optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains considering different LCA metrics simultaneously," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 29, no. 2009, pp. 1276–1280, 2011.
- [20] C. Pieragostini, M. C. Mussati, and P. Aguirre, "On process optimization considering LCA methodology," *J. Environ. Manage.*, vol. 96, no. 1, pp. 43–54, 2012.
- [21] a Azapagic and R. Clift, "The application of life cycle assessment to process optimisation," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 10, pp. 1509–1526, 1999.
- [22] A. Ahmadi and L. Tiruta-Barna, "A Process Modelling-Life Cycle Assessment-MultiObjective Optimization tool for the eco-design of conventional treatment processes of potable water," *J. Clean. Prod.*, vol. 100, pp. 116–125, 2015.
- [23] D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, and L. G. Papageorgiou, "Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment," *Energy*, vol. 85, pp. 181–193, 2015.
- [24] C. H. Lim and H. L. Lam, "Biomass supply chain optimisation via novel Biomass Element Life Cycle Analysis (BELCA)," *Appl. Energy*, 2015.
- [25] S. S. Gan, I. N. Pujawan, Suparno, and B. Widodo, "Pricing decision model for new and remanufactured short-life cycle products with time-dependent demand," *Oper. Res. Perspect.*, vol. 2, pp. 1–12, 2015.
- [26] N. J. Ramadhan, Y. K. Wan, R. T. L. Ng, D. K. S. Ng, M. H. Hassim, K. B. Aviso, and R. R. Tan, "Life cycle optimisation (LCO) of product systems with consideration of occupational fatalities," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 5, pp. 390–405, 2014.
- [27] J. W. Levis, M. a. Barlaz, J. F. DeCarolis, and S. R. Ranjithan, "A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management," *Environ. Model. Softw.*, vol. 50, no. 2013, pp. 51–65, 2013.
- [28] D. Paraskevas, K. Kellens, W. Dewulf, and J. R. Duflo, "Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management," *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 357–370, 2015.
- [29] P. K. Ahluwalia and A. K. Nema, "A life cycle based multi-objective optimization model for the management of computer waste," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 51, no. 4, pp. 792–826, 2007.
- [30] C. Vadenbo, S. Hellweg, and G. Guillén-Gosálbez, "Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks - Part I: Model description," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 89, pp. 52–63, 2014.
- [31] S. Poulidikidou, C. Schneider, a. Björklund, S. Kazemahvazi, P. Wennhage, and D. Zenkert, "A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 704–712, 2015.
- [32] E. Solano, "Multi-objective Linear Programming Optimization for Waste Management Simulation," *SIMUL 2012 Fourth Int. Conf. Adv. Syst. Simulations*, no. c, pp. 125–130, 2012.
- [33] F. Dehghanian and S. Mansour, "Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, no. 10, pp. 559–570,

## 7. BIBLIOGRAFÍA

2009.

- [34] M. J. Alves and J. Clímaco, "A review of interactive methods for multiobjective integer and mixed-integer programming," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 180, no. 1, pp. 99–115, 2007.
- [35] Z. Liu, T. Qiu, and B. Chen, "A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China," *Appl. Energy*, vol. 126, pp. 221–234, 2014.
- [36] L. Čuček, J. J. Klemeš, and Z. Kravanja, "Assessing Direct and Indirect Effects within a LCA Based Multiobjective Synthesis of Bioproducts Supply Chains," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 31, no. July, pp. 1065–1069, 2012.
- [37] A. Ahmadi-Javid and P. Hoseinpour, "Incorporating location, inventory and price decisions into a supply chain distribution network design problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 56, pp. 110–119, 2015.
- [38] Secretaría Distrital de Planeación, "Bogotá Ciudad de Estadísticas: Boletín No. 31: Población, vivienda y hogares a junio 30 de 2011, en relación con la estratificación socioeconómica vigente en el 2011," no. 31, pp. 1–63, 2011.
- [39] Scs Engineers, "Informe de Evaluación Relleno Sanitario Doña Juana Bogota, Colombia," no. 02205510, p. 21, 2007.
- [40] K. Ogata, *Dinamica de Sistemas*, Primera. Mexico: Prentice Hall, 1987.
- [41] F. Aracil, J., & Gordillo, "Dinamica de sistemas.pdf." Alianza Editorial, p. 58, 1995.
- [42] H. TAHA, *INVESTIGACION DE OPERACIONES*, 7° Edicion. PEARSON, Prentice Hall., 2004.
- [43] L. Winston, *Investigación de Operaciones Aplicaciones y algoritmos*, 4° Edicion. Mexico: Thomson, 2005.

## ANEXOS

### ANEXOS

Tipos de luminarias

$i$	Tipo de luminaria	
1	Incandescente	Inc
2	Fluorescente Compacta	Fc
3	Halógena	Hal
4	Led	Led
5	Fluorescente Tubular	FT
6	Tubular Led	TLed

Clase de luminarias producidas de la forma

$j$	Clase de Producción
1	Nacional
2	Importada

Peso de las luminarias

Tipo Luminaria	Gramos
Incandescente	31 g
Fluorescente Compacta	100 g
Halógena	190 g
Led	180 g
Fluorescente Tubular	290 g
Tubular Led	310 g

Matriz de la tasa de migración de luminarias

	Inc	FC	Hal	Led	FT	TLed
Inc	0.2	0.8	0	0	0	0
FC	0	0.5	0.5	0	0	0
Hal	0	0	0.8	0.2	0	0
Led	0	0	0	1	0	0
FT	0	0	0	0	0.83	0.17
TLed	0	0	0	0	0	1

Cantidad de luminarias tipo  $i$  manufacturadas en producción nacional con materia prima nueva en el periodo  $p$ .

Periodo	Inc	Fc	Hal	Led	FT	TLed
1	0	0	0	0	0	0

## ANEXOS

Periodo	Inc	Fc	Hal	Led	FT	TLed
2	91,549.94	471,450.79	466,038.72	163,031.85	4,723.37	40,708.47
3	98,584.14	447,677.09	440,983.45	154,541.43	7,130.97	43,623.67
4	98,649.89	415,291.19	416,840.64	192,741.99	7,407.55	46,467.77
5	96,950.55	383,237.05	394,121.13	240,760.19	7,068.43	49,135.44
6	94,843.60	353,402.41	372,381.82	289,256.65	6,575.35	51,604.59
7	92,675.51	326,013.45	351,392.31	335,950.77	6,066.85	53,879.41
8	90,531.76	257,974.73	374,071.83	380,338.30	5,582.70	55,971.79
9	88,432.03	107,102.01	478,423.67	425,696.92	5,132.65	57,895.26
10	86,379.90	51,692.94	477,441.38	479,325.71	4,717.51	59,663.09
11	84,375.22	33,266.31	435,151.83	536,729.28	4,335.53	61,287.77
12	82,417.07	26,615.91	383,796.10	591,980.97	3,984.36	62,780.85
13	80,504.37	23,779.65	334,551.45	642,277.15	3,661.59	64,152.97
14	78,636.07	22,231.53	290,675.70	686,912.55	3,364.96	65,413.94
15	76,811.13	21,160.94	252,621.05	726,130.34	3,092.36	66,572.76
16	75,028.54	20,300.25	219,937.66	760,501.26	2,841.84	67,637.69
17	73,287.33	19,555.04	191,952.44	790,654.69	2,611.61	68,616.35
18	71,586.52	18,887.35	167,996.61	817,179.00	2,400.04	69,515.73
19	69,925.19	18,278.51	147,472.39	840,592.70	2,205.60	70,342.25
20	68,302.41	17,717.17	129,864.86	861,342.28	2,026.92	71,101.80
21	66,717.29	17,195.33	114,736.38	879,808.80	1,862.71	71,819.23
22	65,145.19	16,692.33	101,652.76	896,096.77	1,674.20	72,522.12
23	63,615.04	16,223.63	90,386.75	910,730.64	1,511.57	73,113.30
24	62,130.26	15,786.89	80,683.55	923,987.33	1,379.84	73,654.50
25	60,682.66	15,373.34	72,297.26	936,010.50	1,264.32	74,150.83
26	59,269.46	14,978.72	65,031.83	946,958.19	1,159.91	74,606.30
27	57,889.35	14,600.47	58,724.32	956,973.58	1,064.58	75,024.36
28	56,541.41	14,236.71	53,237.27	966,180.91	977.21	75,408.13
29	55,224.87	13,885.99	48,454.00	974,686.92	897.06	75,760.42
30	53,936.51	13,546.35	44,271.62	982,548.36	821.36	76,100.72
31	52,658.60	13,211.68	40,581.96	989,598.47	735.61	76,415.78
32	51,420.64	12,890.66	37,357.87	996,311.37	666.43	76,688.65
33	50,217.31	12,580.95	34,529.66	1,002,686.69	608.66	76,938.39
34	49,043.62	12,280.53	31,233.08	1,009,526.33	557.43	77,167.26
35	47,897.75	11,988.48	22,208.06	1,022,073.86	510.98	77,377.11
36	46,778.75	11,704.28	17,661.93	1,030,117.02	468.55	77,569.54
37	45,685.92	11,427.51	15,754.39	1,035,494.30	429.68	77,746.01
38	44,618.63	11,157.86	14,731.53	1,039,958.71	394.05	77,907.85
39	43,576.27	10,895.01	14,031.35	1,044,071.83	361.38	78,059.70
40	42,542.72	10,634.90	13,459.08	1,047,714.77	324.68	78,206.64
41	41,536.89	10,382.11	12,964.52	1,051,310.74	292.94	78,331.71

## ANEXOS

Periodo	Inc	Fc	Hal	Led	FT	TLed
42	40,561.01	10,137.10	12,523.94	1,054,940.05	267.01	78,446.04
43	39,609.71	9,898.46	12,121.75	1,058,530.25	244.22	78,550.70
44	38,681.16	9,665.71	11,749.91	1,062,068.19	223.63	78,646.56
45	37,774.49	9,438.57	11,403.22	1,065,554.31	204.87	78,734.39
46	36,889.10	9,216.87	11,077.88	1,068,991.71	187.7	78,814.86
47	36,024.47	9,000.47	10,770.88	1,072,383.62	171.98	78,888.59
48	35,180.10	8,789.20	10,479.80	1,075,732.97	157.57	78,956.15
49	34,355.53	8,582.95	10,202.64	1,079,042.29	144.38	79,018.05
50	33,550.29	8,381.58	9,937.77	1,082,313.79	132.29	79,074.76

Cantidad de viviendas en el periodo  $p$

Periodo	Hogares
1	930,959.00
2	942,462.72
3	954,108.59
4	965,898.37
5	977,833.83
6	989,916.78
7	1,002,149.03
8	1,014,532.43
9	1,027,068.86
10	1,039,760.20
11	1,052,608.36
12	1,065,615.28
13	1,078,782.93
14	1,092,113.29
15	1,105,608.37
16	1,119,270.20
17	1,133,100.86
18	1,147,102.42
19	1,161,276.99
20	1,175,626.71
21	1,189,971.33
22	1,203,937.20
23	1,218,066.97
24	1,232,362.57
25	1,246,825.95
26	1,261,459.07
27	1,276,263.94

ANEXOS

Periodo	Hogares
28	1,291,242.56
29	1,306,396.97
30	1,321,324.02
31	1,336,011.91
32	1,350,863.07
33	1,365,879.32
34	1,381,062.49
35	1,396,414.43
36	1,411,937.03
37	1,427,632.18
38	1,443,501.79
39	1,459,324.03
40	1,474,641.18
41	1,490,119.11
42	1,505,759.49
43	1,521,564.03
44	1,537,534.46
45	1,553,672.52
46	1,569,979.96
47	1,586,458.57
48	1,603,110.14
49	1,619,936.48
50	1,636,939.43

Numero de luminarias tipo i que ingresan al sistema de los hogares nuevos en cada periodo

Periodo	Inc	FC	Hal	Led	FT	TLed
1	0	0	0	0	0	0
2	11273.6	49120.9	10468.4	3221.0	4831.6	1610.5
3	11413.0	45651.8	13858.6	4891.3	4891.3	815.2
4	10728.7	42089.5	17331.0	6602.3	4126.4	1650.6
5	10861.3	39267.7	19216.1	8354.8	4177.4	1671.0
6	10995.5	36369.7	21145.2	10995.5	3383.2	1691.6
7	10275.1	33394.0	22262.7	13700.1	3425.0	2568.8
8	10402.1	30339.3	23404.6	16469.9	3467.4	2600.5
9	10530.6	26326.5	25449.0	19306.1	2632.7	3510.2
10	10660.7	22209.8	27540.2	22209.8	2665.2	3553.6
11	8993.7	18886.8	29679.2	26081.8	2698.1	3597.5
12	9104.8	15478.2	30046.0	30046.0	2731.5	3641.9
13	10139.1	12904.3	29495.5	33182.5	1843.5	4608.7

## ANEXOS

Periodo	Inc	FC	Hal	Led	FT	TLed
14	9331.3	11197.5	28926.9	37325.0	1866.3	4665.6
15	9446.6	9446.6	27395.0	41564.8	1889.3	4723.3
16	8607.0	7650.6	26777.2	45903.7	1912.7	4781.6
17	8713.3	6777.0	25171.8	49375.5	1936.3	4840.7
18	8821.0	5880.7	23522.6	52925.9	1960.2	4900.5
19	8930.0	4961.1	21828.8	56556.5	992.2	5953.3
20	9040.3	4017.9	20089.6	60268.8	1004.5	6026.9
21	8033.0	4016.5	18074.2	63259.8	1004.1	6024.7
22	7820.9	2932.8	16619.4	63544.7	977.6	5865.7
23	7912.7	2967.3	14836.3	66268.6	989.1	5934.5
24	8005.5	2001.4	14009.7	69047.7	1000.7	6004.2
25	8099.5	2024.9	12149.2	71883.0	1012.4	6074.6
26	8194.5	2048.6	11267.5	73750.9	1024.3	6145.9
27	7254.4	2072.7	10363.4	76689.2	1036.3	6218.0
28	7339.5	2097.0	9436.5	78637.8	1048.5	6291.0
29	7425.7	2121.6	8486.5	80621.5	1060.8	6364.9
30	7314.3	1044.9	8359.1	80456.8	1044.9	6269.4
31	7197.1	1028.2	7197.1	80195.9	1028.2	6168.9
32	7277.1	1039.6	6237.5	82126.9	0.0	7277.1
33	6306.8	1051.1	6306.8	84091.0	0.0	7358.0
34	6376.9	1062.8	5314.1	86088.6	0.0	7439.8
35	6447.8	1074.6	5373.2	87045.5	0.0	7522.5
36	6519.5	1086.6	4346.3	89099.7	0.0	7606.1
37	6592.0	1098.7	4394.6	91188.8	0.0	6592.0
38	6665.2	1110.9	3332.6	92202.4	0.0	7776.1
39	6645.3	1107.6	3322.7	93034.8	0.0	6645.3
40	5361.0	1072.2	3216.6	90064.8	0.0	7505.4
41	5417.3	1083.5	2166.9	92093.7	0.0	7584.2
42	5474.1	1094.8	2189.7	93060.3	0.0	7663.8
43	5531.6	1106.3	2212.6	95143.3	0.0	6637.9
44	5589.7	1117.9	2235.9	96142.0	0.0	6707.6
45	5648.3	1129.7	2259.3	97151.1	0.0	6778.0
46	5707.6	1141.5	1141.5	99312.3	0.0	6849.1
47	5767.5	1153.5	1153.5	100354.7	0.0	6921.0
48	4662.4	1165.6	1165.6	101408.1	0.0	8159.3
49	4711.4	1177.8	1177.8	102472.4	0.0	8244.9
50	4760.8	1190.2	1190.2	103548.0	0.0	8331.4

## ANEXOS

Valores  $Tu$  para una Base de 0.08

Periodo	Tu
0	0
1	0.08
2	0.08
3	0.08
4	0.08
5	0.08
6	0.08
7	0.08
8	0.08
9	0.08
10	0.08
11	0.08
12	0.08
13	0.08
14	0.08
15	0.08
16	0.08
17	0.08
18	0.08
19	0.08
20	0.08
21	0.08
22	0.3
23	0.31
24	0.32
25	0.33
26	0.34
27	0.35
28	0.36
29	0.37
30	0.38
31	0.39
32	0.4
33	0.41
34	0.42
35	0.43
36	0.44
37	0.45
38	0.46

## ANEXOS

39	0.47
40	0.48
41	1
42	1
43	1
44	1
45	1
46	1
47	1
48	1
49	1
50	1

Valores  $Tu$  para una Base de 0.28.

Periodo	Tu
0	0
1	0.28
2	0.28
3	0.28
4	0.28
5	0.28
6	0.28
7	0.28
8	0.28
9	0.28
10	0.28
11	0.28
12	0.28
13	0.28
14	0.28
15	0.28
16	0.28
17	0.28
18	0.28
19	0.28
20	0.28
21	0.28
22	0.28
23	0.28
24	0.52
25	0.53

ANEXOS

26	0.54
27	0.55
28	0.56
29	0.57
30	0.58
31	0.59
32	0.6
33	0.61
34	0.62
35	0.63
36	0.64
37	0.65
38	0.66
39	0.67
40	0.68
41	0.69
42	0.7
43	0.71
44	0.72
45	0.73
46	1
47	1
48	1
49	1
50	1

Valores  $Tu$  para una base de 0.48.

Periodo	Tu
0	0
1	0.48
2	0.48
3	0.48
4	0.48
5	0.48
6	0.48
7	0.48
8	0.48
9	0.48
10	0.48
11	0.48
12	0.48

ANEXOS

13	0.48
14	0.48
15	0.48
16	0.48
17	0.48
18	0.48
19	0.48
20	0.48
21	0.48
22	0.48
23	0.48
24	0.48
25	0.48
26	0.48
27	0.75
28	0.76
29	0.77
30	0.78
31	0.79
32	0.8
33	0.81
34	0.82
35	0.83
36	0.84
37	0.85
38	0.86
39	0.87
40	0.88
41	0.89
42	0.9
43	0.91
44	0.92
45	0.93
46	0.94
47	0.95
48	0.96
49	0.97
50	0.98

## ANEXOS

Valores  $Tu$  para una Base de 0.68.

Periodo	Tu
0	0
1	0.68
2	0.68
3	0.68
4	0.68
5	0.68
6	0.68
7	0.68
8	0.68
9	0.68
10	0.68
11	0.68
12	0.68
13	0.68
14	0.68
15	0.68
16	0.68
17	0.68
18	0.68
19	0.68
20	0.68
21	0.68
22	0.68
23	0.68
24	0.68
25	0.68
26	0.68
27	0.68
28	0.68
29	0.68
30	0.68
31	0.99
32	1
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	1

ANEXOS

39	1
40	1
41	1
42	1
43	1
44	1
45	1
46	1
47	1
48	1
49	1
50	1