

**MODELO DE LOGÍSTICA REVERSIVA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE BOMBILLOS A
BASE DE MERCURIO**

**MAURICIO ANDRÉS BURBANO HOLGUÍN
HERNÁN DARÍO SABOGAL GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

**MODELO DE LOGÍSTICA REVERSIVA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE BOMBILLOS A
BASE DE MERCURIO**

**PRESENTADO POR:
MAURICIO ANDRÉS BURBANO HOLGUÍN
HERNÁN DARÍO SABOGAL GÓMEZ**

**DIRIGIDO POR:
PhD. D. CARLOS JULIO VIDAL HOLGUÍN**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	9
2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	11
3	OBJETIVOS.....	15
3.1	OBJETIVO GENERAL:	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	15
4	DISEÑO METODOLÓGICO	16
5	ASPECTOS LEGALES	17
6	CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BOMBILLOS.....	23
6.1	SEGÚN LA APLICACIÓN	23
6.2	SEGÚN LA TECNOLOGÍA.....	24
6.2.1	Fluorescentes:	26
6.2.1.1	Lineales o tubulares:	27
6.2.1.2	Compactas:	28
6.2.2	Vapor de mercurio:.....	28
7	COMPONENTES PRESENTES EN LOS BOMBILLOS A BASE DE MERCURIO	29
7.1	SÓLIDOS	30
7.2	MERCURIO.....	31
7.3	MERCURIO PRESENTE EN RESIDUOS.....	32
8	CONSUMO	33
9	DESECHOS.....	41
10	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE BOMBILLOS A BASE DE MERCURIO	45
10.1	DESMERCURIZACIÓN TÉRMICA	46
10.2	KAAP	46
10.3	MÉTODO SHREDDER.....	47
10.4	CORTE Y SOPLADO	48
10.5	TRITURACIÓN Y SEPARACIÓN	49
10.6	DESTILADOR DE MERCURIO	50
10.7	MÉTODO DE CORTADO FINAL.....	51
10.8	MÉTODO DE LAVADO DE VIDRIO QUEBRADO.....	52
10.9	OTROS MÉTODOS DE REDISOLUCIÓN DE PRODUCTOS ESPECÍFICOS	52
10.10	MÉTODO CENTRÍFUGO DE SEPARACIÓN	52
11	RECICLAJE Y DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA DE REVERSA DE BOMBILLOS	52
11.1	LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE RECOLECCIÓN	54
11.2	TRANSPORTE DE MATERIAL RECOLECTADO	55
11.3	INVENTARIO DE PRODUCTO RECOLECTADO:	56
11.4	PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN INCLUYENDO PRODUCTO RECICLADO:.....	57
11.5	OTROS ASPECTOS QUE CONFORMAN LA RED DE LOGÍSTICA REVERSIVA	57

12	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MODELO DE RECOLECCIÓN	59
13	FORMULACIÓN DEL MODELO:	62
13.1	PARÁMETROS	64
13.2	VARIABLES DE DECISIÓN.	66
13.3	FUNCIÓN OBJETIVO.....	67
13.4	RESTRICCIONES:	70
13.5	CASO ESTUDIO	77
13.6	RESULTADOS:	82
14	BIBLIOGRAFÍA	94

TABLA DE CONTENIDO

Tabla 1. Cantidades de bombillas consumidas en el año 2007 en Colombia	11
Tabla 2. Comparación entre diferentes tipos de tecnologías por potencia, participación.....	26
Tabla 3. Distribución por peso de los elementos en las bombillas según la tecnología	30
Tabla 4. Cantidad promedio de mercurio contenida en una bombilla según su tecnología	31
Tabla 5. Cantidad de mercurio contenido en los residuos de los bombillos según tecnología	32
Tabla 6. Cantidades de bombillos consumidos en año 2007 en Colombia por sectores.	34
Tabla 7. Consumo de bombillas por sectores en Colombia	35
Tabla 8. Proyección de la participación de Cali en el Consumo energético de Colombia por años.....	37
Tabla 9. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector residencial	38
Tabla 10. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector industrial.....	39
Tabla 11. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector comercial.....	39
Tabla 12. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector de alumbrado público	40
Tabla 13. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector oficial	40
Tabla 14. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en otros sectores	41
Tabla 15. Comparación entre vida nominal vs vida real de los bombillos por tecnología	41

Tabla 16. Probabilidad de falla.	43
Tabla 17. Probabilidad de falla de los bombillos	43
Tabla 18. Proyección de generación de desechos en el sector residencial	44
Tabla 19. Proyección de generación de desechos en el sector industrial	45
Tabla 20. Proyección de generación de desechos en el sector comercial	45
Tabla 21. Componentes aprovechables de los residuos de fuentes de iluminación	60
Tabla 22. Total bombillos que llegan a cada punto de recolección desde todas las comunas	78
Tabla 23. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta local.	81
Tabla 24. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta externa. ...	81
Tabla 25. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta externa. (gr)	82
Tabla 26. Resultado desglosado de los componentes de la F.O	84
Tabla 27. Resultado para la apertura de puntos de recolección.	85
Tabla 28. Resultado para las capacidades de los puntos de recolección.	85
Tabla 29. Resultado para la apertura de centros de acopio.	86
Tabla 30. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 1 por periodo.	87
Tabla 31. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 2 por periodo.	87
Tabla 32. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 3 por periodo.	88

Tabla 33. Unidades enviadas hacia la planta de tratamiento local.	89
Tabla 34. Unidades enviadas hacia la planta de tratamiento externa.	89
Tabla 35. Unidades llegadas a planta de tratamiento local.	90
Tabla 36. Material recuperado en la planta de tratamiento local.	90
Tabla 37. Material vendido por periodo.	91
Tabla 38. Mercurio total recuperado.	92
Tabla 39. Emisiones de CO ₂ generadas por la actividad.	92

TABLA DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama visual de clasificación de los bombillos por tipo de tecnología Fuente: Elaboración propia.....	25
Fig. 2. Bombillo fluorescente tubular. Fuente: (OSRAM, 2014).....	27
Fig. 3. Bombillo fluorescente compacto. Fuente: (OSRAM, 2014).. ..	28
Fig. 4. Bombillo vapor de mercurio. Fuente: (PHILIPS, 2014).....	29
Fig. 5. Comparación entre el consumo energético proyectados de Cali vs Colombia. Fuente: Elaboración propia.	37
Fig. 6. Descripción del proceso de desmercurización térmica, Kaap. Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008)	47
Fig. 7. Proceso con tecnología de corte y soplado. Fuente: (Ambilamp, 2005).....	49
Fig. 8. Tecnología de trituración y separación. Fuente: (Ambilamp, 2005).....	50
Fig. 9. Destilador de mercurio. Fuente: (Ambilamp, 2005)	51
Fig. 10. Representación gráfica de la cadena de logística inversa. Fuente: Elaboración propia.....	61
Fig. 11. Localización de puntos de recolección. Fuente: Elaboración propia... ..	79
Fig. 12. Localización de centros de acopio. Fuente: Elaboración propia.....	80
Fig. 13. Resultado corrida de modelo. Fuente: Elaboración propia.....	83

1 INTRODUCCIÓN

Las políticas gubernamentales y la publicidad han incrementado en los últimos años el consumo de bombillas ahorradoras en los hogares. Al llegar al final de su vida útil, estos elementos constituyen un conjunto de residuos peligrosos debido a la presencia de gases tóxicos como el mercurio.

En Colombia, se ha venido dando un periodo de por lo menos 10 años de transición de bombillos incandescentes a los bombillos ahorradores, en el cual se ha incrementado el uso de estos últimos de manera acelerada, pero poco se ha trabajado sobre el tratamiento de los residuos que estos producen (El Espectador, 2012). Los bombillos y la luz producida por éstos, son seguros durante su vida útil, pero en el momento de romperse o ser tratadas como cualquier otro residuo sólido no peligroso, se puede ver altamente afectada la salud de las personas y del medio ambiente en general, debido a su contenido de mercurio gaseoso. Éste puede llegar a contaminar el aire, agua y suelos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2002).

Además, el 80% del mercurio inhalado por el ser humano se retiene, distribuyéndose rápidamente por todo el cuerpo humano y atacando el sistema nervioso central. Puede causar síntomas como mareo, desmayos, dificultad para respirar y otras implicaciones mayores al momento de ser inhalado (Alcaraz, *et al.* 1983). Por esto es de suma importancia que se realice la gestión necesaria para así controlar que estos residuos sean tratados de una manera responsable y que no lleguen a ser perjudiciales.

Una bombilla ahorradora está constituida principalmente por vidrio, metal, plástico, mercurio, argón, entre otros gases. Todos estos elementos causan un impacto ambiental grande, sobre todo si se tiene en cuenta el volumen creciente de bombillos. Así mismo gran parte de estos elementos pueden ser recuperados

para tratamiento o reintegrados al proceso productivo de bombillas (Hernández, A., *et al.*, 2011).

Sin embargo, el seguimiento y reciclaje de cualquier tipo de residuo conlleva un elevado grado de dificultad. Este problema puede ser abordado en el marco de la ingeniería industrial por el área de logística, apoyado en herramientas de optimización, con un enfoque direccionado al seguimiento de los productos, empaques y derivados después de su comercialización y al final de su vida útil, con el fin de reducir el impacto ambiental y además estudiar los beneficios e implicaciones que tendría el desarrollo de este tipo de actividad.

La parte de la logística que se enfoca en el estudio de estos aspectos es la logística reversiva, la cual contiene elementos que aunque no necesariamente están enfocados a la gestión de residuos y protección ambiental, son fundamentales a lo largo del estudio, donde no sólo se busca coordinar y dirigir el flujo de información, de bienes y de dinero, sino también, residuos de productos al final de su vida útil con el fin de lograr un ahorro de materias primas y mejoras en la gestión de buenas prácticas medioambientales.

Se presenta entonces un proyecto sobre logística reversiva que va encaminado a la recuperación de bombillos y lámparas ahorradoras a base de mercurio, y su posterior aprovechamiento, o tratamiento de estos elementos que no puedan ser reciclados, según sea el caso. Se tendrá en cuenta aspectos legales, sociales, económicos, ambientales y de proceso, los cuales son elementos clave para lograr la definición de un sistema que pueda ser aplicado a las empresas productoras de bombillos.

2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Desde el año 2005, Colombia expidió la política para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, cuyos objetivos específicos orientan su aplicación a la minimización y prevención en la generación y a promover el manejo ambientalmente adecuado de los RESPEL (residuos peligrosos). Esta legislación incluye normatividad referente a Residuos Sólidos Especiales y Peligrosos, Residuos Hospitalarios, Gestión de Cadenas Consumo y Post Consumo, Residuos de gases refrigerantes que son Sustancias Agotadoras de ozono.

En la Tabla 1 se puede observar las proporciones de consumo de bombillas en el país, lo que muestra que es un problema preocupante para toda la comunidad, sabiendo que de este consumo un promedio 8.800 toneladas anuales de bombillas finaliza su ciclo de vida en rellenos sanitarios, y que además se calcula que para el año 2015 esta cifra se incrementará aproximadamente en un 93,18%

Tabla 1. Cantidades de bombillas consumidas en el año 2007 en Colombia

Tipo de bombilla.	Unidades consumidas (millones).	Participación.
Incandescentes	76,2	70,4%
Fluorescente tubular	18,7	17,3%
Fluorescente compacta	6,5	6,0%
Mercurio, haluro y sodio	6,8	6,3%
Total	108,2	100%

Fuente: Gestión Posconsumo de residuos peligrosos. Universidad Tecnológica de Pereira, Carder, 2011.

Se aprecia entonces que la disposición o el tratamiento que se le da a los bombillos utilizados actualmente, no puede asegurar la estabilidad de éstos, es decir, el hecho que no se dañen al momento de desecharlos, debido a la fragilidad de los diferentes tipos de bombillos en el mercado, haciendo inevitable la contaminación por lixiviados, que contaminan recursos hídricos importantes.

Esta contaminación está dada por la composición misma de los bombillos que puede llegar a contener una gran variedad de gases inertes incluyendo el mercurio, elemento extremadamente tóxico, que en su contacto con los humanos, puede causar efectos negativos incluyendo daños en riñones, hígado, estómago, intestinos, pulmones y una especial sensibilidad del sistema nervioso. Cabe resaltar que no se necesita de una exposición o un contacto permanente para afectar la salud de las personas, en ocasiones basta con un único contacto. Además todos los elementos de las lámparas y bombillos por estar en contacto directo con el mercurio serán considerados como residuos peligrosos y su disposición no puede ser la de la misma manera que se le da a un residuo común y corriente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2002).

La práctica más común en los hogares de la región es la de disposición final en rellenos sanitarios para este tipo de residuos. Esto se debe en parte por la falta de cultura recicladora de las personas, no sólo de la región sino de toda el área colombiana. Y también debido a la falta de centros de acopio que faciliten la recolección y selección de estos desechos. Otro factor que agrava la situación es la insuficiencia de campañas de sensibilización con respecto al tema. Sin embargo estos productos contienen materiales que son altamente recuperables entre ellos el vidrio, metal, plástico y el mismo mercurio que pueden llegar a ser reincorporados a los procesos productivos, o destinarse a la manufactura de otros productos.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial define la responsabilidad extendida del productor, como la ampliación de las responsabilidades de los fabricantes e importadores a diferentes etapas del ciclo de vida del producto, especialmente su responsabilidad en la gestión de los residuos derivados del consumo del producto. Es decir, en el momento que se ha consumido, dañado, o reemplazado el producto, en otras palabras, al final de la vida útil. Además la Resolución 1511 de 2010 identifica a un productor de bombillas como toda persona natural o jurídica que:

- a) Fabrique en el país bombillas bajo su propio nombre o marca o haga diseñar o fabricar bombillas y las ponga en el mercado bajo su nombre o marca;
- b) Ponga en el mercado bajo su nombre o marca bombillas fabricadas por terceros, siempre y cuando la marca del fabricante no aparece en la bombilla;
- c) Importe o introduzca al país bombillas procedentes de otros países (incluidos aquellos que importan para su propio uso).

Así mismo la Resolución 1511 de 2010 describe planes de gestión posconsumo y sistemas de recolección selectiva que incluyen legislación acerca de la formulación de los planes de recolección, participación de las partes interesadas, puntos de recolección o centros de acopio y comunicación con los usuarios.

Con todas estas situaciones se hace necesario un estudio más a fondo sobre la situación de los productos al final de su vida útil. El estudio de los residuos peligrosos ha sido llevado a cabo bajo diversos enfoques, actualmente la perspectiva ambiental se puede encontrar en una gran diversidad de artículos no sólo por la presión de los gobiernos alrededor del mundo, sino también por la buena imagen de responsabilidad social de las empresas frente a sus consumidores.

El manejo y transporte de estos residuos se puede decir que constituyen los retos más importantes en la recolección de estos residuos, debido a la fragilidad del

material y que después de su uso, no se cuentan con los empaques que los protegen, además, la variabilidad en su forma no permite el apilamiento efectivo de éstos.

El almacenamiento y posterior tratamiento de los residuos recolectados representa más aspectos a resolver relacionados con el tiempo de almacenamiento y el tipo de tratamiento que se va realizar a los residuos, dependiendo de si se planea realizar una re manufactura o simplemente se hace un tratamiento para llevar al sitio de disposición final; la empresa responsable deberá tomar esta decisión teniendo en cuenta los diferentes factores que pueden influir en el desarrollo de sus planes. Entre estos se pueden incluir la legislación existente, el impacto ambiental y la rentabilidad de la compañía entre otros. Entonces, la pregunta de investigación que surge es: ¿cómo se debería diseñar un modelo de gestión y recuperación de residuos peligrosos como bombillos y lámparas a base de mercurio?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL:

Analizar los procesos de logística reversiva para la gestión integral de residuos producidos por bombillos a base de mercurio, a través de la formulación de un modelo que posibilite conseguir un equilibrio entre los costos de gestión y el impacto ambiental generado por éstos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar las características más relevantes de los tipos de bombillos y lámparas en consideración, para determinar a cuáles se les va a generar el modelo de gestión integral.
- Identificar las alternativas de recuperación y gestión integral de los residuos identificados, para conocer las características principales de éstas.
- Determinar los indicadores que midan los aspectos de recuperación integral de los bombillos.
- Formular el modelo matemático de logística reversiva, resolver un caso de estudio y analizar las soluciones arrojadas por éste.

4 DISEÑO METODOLÓGICO

En cuanto al primer objetivo se tomaron los datos de demanda y de desechos basados en investigaciones y documentos institucionales, en este caso referentes a la ciudad de Santiago de Cali. Con esta información se eligieron los tipos de bombillas más utilizados para proceder con la obtención de información importante proveniente de la documentación.

Se recolectó información relacionada con el tipo de material y la cantidad usada para producir las bombillas, para qué tipo de espacios o clientes se producen, su demanda y quiénes son o dónde se encuentran sus principales productores.

En cuanto al segundo objetivo, relacionado con las alternativas de tratamiento, la investigación se concentró en los métodos más utilizados para el tratamiento del tipo de bombillos previamente escogidos. La información relevante, como lo es la cantidad de materiales que se pueden recuperar de cada tipo de bombillo, entre otros, se consiguió de la documentación existente.

Para la consecución del tercer objetivo, se definieron las variables, parámetros y medidas de desempeño que se consideren influyentes, ya sea por criterio propio o basado en la documentación, para la obtención de resultados que apunten a un equilibrio entre el factor económico y el factor ambiental.

Por último se realizó el desarrollo de un modelo matemático que incluya los elementos definidos en el tercer objetivo, para posteriormente, utilizando un software de optimización, correr el modelo y proseguir con el análisis de los resultados obtenidos.

5 ASPECTOS LEGALES

Para comenzar con una descripción de los bombillos se debe partir del punto de la definición de estos mismos, como primera medida los bombillos son considerado como un Residuo de Aparatos Electrónicos y Eléctricos (RAEE), éstos pueden ser cualquier tipo de aparato o dispositivo que utilice energía eléctrica para su funcionamiento y que haya llegado al fin de su vida útil. Los componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en el que se desechan son también considerados RAEE (Casas y Cerón. 2013).

Con respecto a los aspectos legales existen algunas legislaturas que aplican para tener en cuenta a la hora de diseñar un modelo de gestión de residuos peligrosos (Lúmina, 2014).

La ley 253 de 1996, emitida por el gobierno, enuncia que se aprueba el convenio de Basilea, sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1986. Esta ley define algunos elementos a tener en cuenta como:

Desechos: se entienden como sustancias u objetos cuya eliminación, se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación laboral.

Manejo: se entiende como la recolección, transporte y eliminación de los desechos peligrosos o de otros desechos, incluida la vigilancia de los lugares de eliminación.

Movimientos transfronterizos: Es el movimiento de desechos peligrosos otros desechos procedentes de una zona sometida a la jurisdicción nacional de un Estado y destinado a una zona sometida a la jurisdicción nacional de otro Estado,

o a través de esta zona, o a una zona no sometida a la jurisdicción nacional de ningún Estado o a través de esta zona, siempre que el movimiento afecte a dos Estados por lo menos.

Además, esta ley clasifica y define los desechos peligrosos; los bombillos a base de mercurio se encuentran dentro de la categoría Y29: que contiene mercurio, compuestos de mercurio, y con características H6.1: Tóxicos (venenos) agudos Sustancias o desechos que pueden causar la muerte o lesiones graves o daños a la salud humana, si se ingieren o inhalan o entran en contacto con la piel. Y H12 Eco-tóxico sustancias o desechos que, si se liberan, tienen o pueden tener efectos adversos inmediatos o retardados en el medio ambiente, debido a la bioacumulación o los efectos tóxicos en los sistemas bióticos.

Así mismo, el decreto 1609 de 2002 por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera, tienen en cuenta los requisitos necesarios, tanto técnicos como de seguridad para el manejo y transporte de mercancías peligrosas. Aquí se define una mercancía peligrosa como materiales perjudiciales que durante la fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso, pueden generar o desprender polvos, humos, gases, líquidos, vapores o fibras infecciosas, irritantes, inflamables, explosivos, corrosivos, asfixiantes, tóxicos o de otra naturaleza peligrosa, o radiaciones ionizantes en cantidades que puedan afectar la salud de las personas que entran en contacto con éstas, o que causen daño material.

Se debe considerar que los costos de transportes para estos residuos serán mucho mayores que un transporte ordinario, ya que según el decreto se debe contar con medidas de seguridad muy altas, como por ejemplo planes de contingencia, de emergencia, entrenamiento técnico para los involucrados en la cadena de transporte entre otros.

El decreto 4741 del 2007, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión ambiental, define las bombillas como un residuo peligroso debido a su composición con metales venenosos, y reglamenta las responsabilidades de los participantes de una cadena de suministros de productos que al final de su vida útil se convierten en desechos peligrosos. Este decreto define y clasifica a los residuos peligrosos igual que la ley 253 de 1996.

En la resolución 1511 del 2010, por la cual se establecen los Sistemas de Recolección selectiva y gestión ambiental de Residuos de bombillas y se adoptan otras disposiciones, además se detallan los sistemas de recolección selectiva. En esta resolución se definen ciertos elementos claves para el estudio de la gestión pos consumo. Además tiene en cuenta sanciones y apoyos a entidades municipales y autoridades ambientales.

Algunos de los elementos definidos en la resolución 1511 del 2010 son:

Acopio de residuos de bombillas. Acción tendiente a reunir temporalmente los residuos de bombillas desechados por el consumidor, cuya recolección y gestión se encuentran enmarcadas en un sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de bombillas, en un lugar acondicionado para tal fin, de manera segura y ambientalmente adecuada; con el objeto de facilitar su recolección, clasificación y cualquier actividad de preparación previa a una posterior gestión y manejo ambiental. El lugar donde se desarrolla esta actividad se denominará centro de acopio.

Almacenamiento. Este almacenamiento comprende el depósito temporal de residuos o desechos peligrosos en un espacio físico definido y por un tiempo determinado, con el fin de ser aprovechados y/o valorizados, tratados y/o dispuestos posteriormente.

Aprovechamiento y/o valorización de residuos de bombillas. El reprocesado de los materiales de los residuos a través de operaciones de reciclaje o recuperación; en el contexto de un proceso productivo, con el objeto de destinarlos a los mismos fines a los que se destinaban originalmente o a otros procesos.

Bombilla. Dispositivo eléctrico que suministra el flujo luminoso por transformación de energía eléctrica. Puede ser incandescente si emite luz por calentamiento o luminiscente si hay un paso de corriente a través de un gas.

Mecanismo de recolección equivalente. Medio que puede emplearse para la devolución de los residuos de bombillas para su posterior traslado a los centros de acopio, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, valorización y/o disposición final, como alternativa a los puntos de recolección.

Proveedor o expendedor. Toda persona, natural o jurídica, que distribuya u ofrezca al público en general, o a una parte de él, a cambio de un precio, uno o más bienes o servicios producidos por ella misma o por terceros, destinados a la satisfacción de una o más necesidades de ese público.

Punto de recolección. Sitio o lugar acondicionado, destinado a ofrecer a los consumidores la posibilidad de devolver los residuos de bombillas para su posterior aprovechamiento y (o valorización y/o disposición final.

Recolección selectiva. La Recolección de los residuos de bombillas, de forma diferenciada de otros flujos de residuos, de manera que facilite su posterior gestión y manejo ambiental.

Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental De Residuos de bombillas. Instrumento de control y manejo ambiental que contiene los requisitos

y condiciones para garantizar la recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos de bombillas por parte de los productores.

La resolución 1511 de 2010 también enuncia que para el 2012, los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de bombillas debían asegurar la recolección del 5% de los residuos de bombillas. Y que para los años posteriores se debía garantizar una recolección con incrementos anuales mínimos del 5% hasta alcanzar el 60% como mínimo de residuos de bombillas.

Esta resolución también menciona aspectos a tener de cuenta, dentro del modelo a formular. Entre estos aspectos se encuentra que en los centros de acopio se pueden llevar a cabo actividades de separación y clasificación de los residuos según su tecnología o tipo de uso. Pero que su capacidad no deberá superar los 32m³. En caso de excederse, se entenderá que se tome como un almacenamiento y en consecuencia de esto se le aplicarán las normas ambientales específicas para estos casos. Adicionalmente no podrán permanecer más de 6 meses en el centro de acopio, además de que no podrán ser instalados de ninguna manera en la vía pública.

A partir del año 2016, solo se podrán gestionar los residuos de bombillas a través de actividades de aprovechamiento y valorización con miras a ser reciclados en instalaciones dentro y fuera del país como se enuncia en la resolución 1511 de 2010.

Por último se remarcan algunas prohibiciones a partir de esta resolución que impiden a los productores, disponer de bombillos en rellenos sanitarios, quemar residuos de bombillos a cielo abierto, enterrar residuos de bombillos o abandonarlos en el espacio público.

La resolución 0307 del 2012, por la cual se aprueban los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de bombillos, llamado Lúmina, a la vez que establece sus obligaciones como programa.

6 CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BOMBILLOS

En Colombia el mercado de la iluminación está diversificado en varias categorías y los bombillos se pueden clasificar según la aplicación y según la tecnología. (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

6.1 SEGÚN LA APLICACIÓN

La clasificación según su aplicación hace referencia al uso que pretenda dar el consumidor al producto; para tal clasificación se encuentran las siguientes categorías (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008):

- **Gama alta:** Son los bombillos y demás productos que cumplen con una característica de prioridad a estos aspectos decorativos la eficiencia energética. Normalmente su valor unitario es superior al precio de las bombillas de consumo masivo. El consumo tiene muy baja rotación. Algunos ejemplos de aplicaciones en interiores se aprecian en museos, galerías de arte, joyerías y sitios con generación de ambientes especiales; para el caso de alumbrado exterior, se emplea en la iluminación de túneles y viaductos, autopistas, espectáculos públicos y sistemas de emergencia.
- **Gama media:** Esta gama hace referencia a productos de iluminación que buscan un balance entre la reproducción del color, la seguridad y el consumo energético. Entre sus aplicaciones en interiores se encuentran los ambientes comerciales como grandes superficies y supermercados, restaurantes, centros comerciales, empresas dedicadas a manufactura y ensamblaje; y para aplicaciones en exteriores visualizan en fachadas, fuentes, piletas y escenarios deportivos.
- **Gama baja:** Los productos pertenecientes a esta gama son todos aquellos que son considerados de consumo masivo, aquellos que tienen la función única y exclusivamente de iluminar o servir como sustituto de la iluminación natural, sus adelantos se enfocan mucho a generar ahorros en consumo energético sobre la

reproducción del color, sus aplicaciones son lugares de trabajo como oficinas y vivienda en general.

6.2 SEGÚN LA TECNOLOGÍA

Según su tecnología se pueden encontrar aspectos más técnicos referentes a características como el tipo de materiales que se utilizan, dimensiones de los productos, etc. Bajo esta clasificación, en el mercado colombiano, podemos encontrar las siguientes tecnologías. (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008):

- Incandescente
- Fluorescente lineal o tubular
- Fluorescente compacta
- Vapor de mercurio
- Sodio
- Haluros metálicos
- Led (Diodos emisor de luz)

Debido a la facilidad para la caracterización de los bombillos, refiriéndose a aspectos técnicos, se ha decidido trabajar bajo la clasificación de bombillos según la tecnología.

Como se ha mencionado a lo largo de la investigación, el estudio se centrará en los bombillos cuyo componente principal es el mercurio, los cuales son: Fluorescente lineal o tubular, Fluorescente compacta.

Con el fin de llevar a cabo el primer objetivo, se realizó la investigación de los diferentes tipos de bombillos y se logró descomponer en la clasificación que se muestra en la Figura 1. Debido a su alto contenido de mercurio, los bombillos que se han elegido para proceder con el estudio son los de tecnología fluorescente y los de vapor de mercurio.

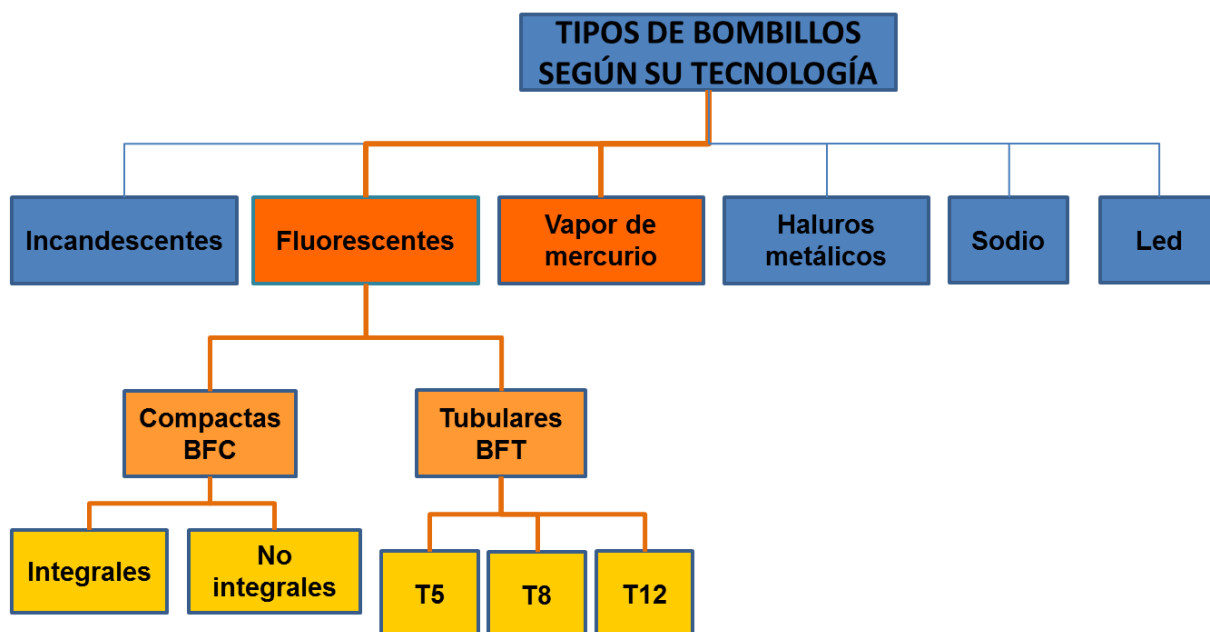


Fig.1.Diagrama visual de clasificación de los bombillos por tipo de tecnología.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se puede observar la comparación entre los diferentes tipos de bombillos presentes en el mercado respecto al consumo y la duración estimada de vida útil. En la cual la participación se refiere a la distribución de la potencia utilizada por cada tipo de bombillo según los diferentes productores. La vida nominal promedio se muestra en la última columna para cada tipo de bombilla. Además muestra que el rango de potencia utilizado en las lámparas fluorescente compacta y fluorescente tubular es bastante bajo en relación con otros tipos de bombilla. De igual manera se puede apreciar que el rango de duración es mucho mayor que el de las bombillas incandescentes.

Estas dos características son principalmente las que convierten a este tipo de bombillos en las que es más probable que a largo plazo acaparen el mercado de iluminación en Colombia. Se aprecia que las incandescentes muestran mayor participación en aquellas que tienen una potencia entre 60 y 100W, ya que son los que se acostumbra a usar para tipo residencial. Igualmente muestra como la vida nominal de los bombillos fluorescentes es mucho más extensa y el consumo de

energía bastante reducido, esto podría ser un factor fundamental del porqué los gobiernos buscan una transición de los bombillos incandescentes a los fluorescentes.

Tabla 2. Comparación entre diferentes tipos de tecnologías por potencia, participación y vida nominal.

Tecnología	Rango de Potencia	Participación	Vida Nominal (HORAS)
Incandescente	< 40 W	5%	900
	60 W < P < 100 W	90%	
	P > 100 W	5%	
Fluorescente compacta	< 12 W	12%	6000
	13 W < P < 32 W	85%	
	P > 33 W	3%	
Fluorescente tubular	< 12 W	0%	10000
	13 W < P < 32 W	70%	
	P > 33 W	30%	
Haluros	< 76 W	5%	4000
	77 W < P < 151 W	10%	
	P > 151 W	85%	
Sodio	< 76 W	70%	26000
	77 W < P < 151 W	20%	
	P > 151 W	10%	
Mercurio	< 76 W	0%	16000
	77 W < P < 151 W	50%	
	P > 151 W	50%	

Fuente: Tomo 1: Fuentes de iluminación. Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008

A continuación se presenta la descripción de los dos tipos de bombillos detalladamente.

6.2.1 Fluorescentes:

Las bombillas fluorescentes son también denominadas de bajo consumo, las cuales permiten ahorrar más de un 80% de energía en comparación con las

bombillas tradicionales incandescentes. Esto representa una gran contribución para el medio ambiente y para el presupuesto de los consumidores. Los bombillos fluorescentes a su vez se clasifican en bombillas fluorescentes tubulares o lineales (BFT) y bombillas fluorescentes compactas (BFC) (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

6.2.1.1 Lineales o tubulares:

Las bombillas fluorescentes tubulares (BFT) o también llamadas lineales contienen una base de mercurio a baja presión de elevada eficacia y vida útil, y presentan una alta demanda ya que son ideales para ambientes comerciales, tales como grandes superficies y supermercados, restaurantes, centros comerciales, como también en ambientes industriales para proceso de manufactura y consumo residencial. Las bombillas fluorescentes más usadas hoy en día son las T8 (26 mm de diámetro); sin embargo, se han desarrollado las T5 (16 mm de diámetro) que sólo funcionan con equipo auxiliar electrónico, esto, junto a su menor diámetro les proporciona una mayor eficiencia luminosa, que puede alcanzar hasta 104 lm/W. Además existen las T12 (38 mm de diámetro) (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).



Fig. 2. Bombillo fluorescente tubular. **Fuente:** (OSRAM, 2014)

6.2.1.2 Compactas:

Éstas al igual que las tubulares poseen el mismo funcionamiento con respecto al mercurio de baja presión y están formadas por uno o varios tubos fluorescentes doblados. Han llegado al mercado como una alternativa de mayor eficacia y mayor vida a las lámparas incandescentes. Algunas de estas lámparas compactas cuentan con un equipo auxiliar incorporado (lámparas integradas) que son capaces de sustituir directamente a las lámparas incandescentes en su portalámparas (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).



Fig. 3. Bombillo fluorescente compacto. Fuente: (OSRAM, 2014)

6.2.2 Vapor de mercurio:

Las lámparas de vapor de mercurio pueden ser utilizadas tanto en exteriores como en interiores, algunos de sus usos más comunes son: fachadas, fuentes, piscinas, grandes superficies y escenarios deportivos, todos estos son lugares que requieren de una gran potencia luminosa. Debido a su gran potencia emiten mayor flujo luminoso que los bombillos de tecnología fluorescente, aunque su eficacia es menor. Por su forma y tamaño, se suelen emplear en iluminación de grandes

áreas (calles, naves industriales, etc.) (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

Los bombillos de tecnología BFT y BFC tienen una buena relación de consumo energético y duración de la vida útil para espacios cerrados. A diferencia de los de vapor de mercurio, debido a su mayor potencia permiten mayor flujo luminoso que la fluorescencia, aunque su eficacia es menor.



Fig. 4. Bombillo vapor de mercurio. Fuente: (PHILIPS, 2014)

7 COMPONENTES PRESENTES EN LOS BOMBILLOS A BASE DE MERCURIO

Los bombillos a base de mercurio están compuestos por diferentes materiales que permiten y garantizan un correcto funcionamiento. Entre estos se encuentran algunos de tipo metálico, plástico, cerámico, entre otros; que pueden llegar a ser recuperables y reciclables en algunos casos como se presenta con más detalle a continuación.

7.1 SÓLIDOS

En la Tabla 3 se muestra de manera detallada la composición de sólidos de los tipos de bombillos anteriormente mencionados en función del peso de los componentes encontrados al interior de éstos. Los valores expresados representan el promedio para diferentes marcas y tipos de bombillos.

Tabla 3. Distribución por peso de los elementos en las bombillas según la Tecnología

TECNOLOGIA	PESO PROMEDIO (g)	COMPONENTE	PESO COMPONENTE (g)
BFC Integral	81,83	Vidrio	38,16
		Base Metálica	5,78
		Plástico	17,32
		Tarjeta electrónica	4,11
		Componentes electrónicos	16,46
BFC no Integral	77,65	Vidrio	66,20
		Metálicos	3,24
		Plástico y cemento	8,22
BFT (T12)	296,93	Tapas metálicas	13,72
		Vidrio	283,21
BFT (T8)	132,99	Tapas metálicas	6,06
		Vidrio	126,93
Vapor de Mercurio	161,02	Vidrio	106,35
		Cámara de mercurio	13,88
		Filamentos metálicos	16,17
		Soldadura	0,50
		Cemento	13,28
		Fracción metálica	10,85

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

Como se puede observar, los componentes que más tienen presencia en la estructura de los bombillos son el vidrio, plástico y el aluminio. Siendo el vidrio el componente con mayor presencia en todos los tipos de bombilla sin excepción. Por la configuración misma del bombillo es el elemento que mantiene mayor

contacto con el mercurio y en la posible fractura del vidrio, parte del mercurio se evapora y otro gran porcentaje queda pegado a las paredes del vidrio.

Además se observa que en las BFC de tipo integral el plástico tiene un peso mayor en relación con la no integral ya que no requiere de ningún otro dispositivo para su funcionamiento.

7.2 MERCURIO

Adicionalmente se presentan los contenidos de mercurio en diferentes tipos de bombillos, basados en las especificaciones de los fabricantes. Debido a la gran cantidad de referencias y de marcas productoras de bombillos, se encontró que el contenido de mercurio presente en las diferentes tecnologías es muy variable. Sin embargo en la Tabla 4 se presenta un aproximado de la cantidad que se puede encontrar en algunas de éstas en las categorías más generales.

Tabla 4. Cantidad promedio de mercurio contenida en una bombilla según su tecnología.

Compactas	T5	T8	T12
1.7 mg	1.5 mg	6 mg	22 mg

Fuente: (M. Jang, *et al.*, 2005) (OSRAM, 2014)

Una pregunta que surge es ¿Por qué se debe usar el mercurio? El mercurio es un elemento de la tabla periódica (Hg), que se encuentra naturalmente en el medio ambiente. A pesar de ser un metal venenoso, es necesaria una minúscula cantidad de éste para el funcionamiento tanto de las bombillas de descarga como de los bombillos fluorescentes ya que una descarga eléctrica en el tubo causa que los átomos de mercurio emitan luz, este mercurio debe estar contenido dentro del vidrio del bombillo y no hay manera que se escape a menos que el bombillo sufra daños. La luz emitida se encuentra en el rango ultravioleta (UV), y es por lo tanto

invisible para nuestros ojos; pero el tubo se encuentra revestido con una capa de un material fluorescente llamado fósforo, el cual absorbe la luz ultravioleta y la remite en el espectro visible.(OSRAM, 2014).

La iluminación fluorescente es energéticamente mucho más eficiente que la tecnología incandescente, pero el espectro producido puede hacer que ciertos colores no parezcan naturales, esto es así porque el espectro de emisión no es continuo, sino que se encuentra formado por un limitado número de longitudes de onda (líneas de emisión). Además esta tecnología permite y asegura una mayor eficiencia de la luz y genera ahorros de energía y reducir las emisiones de CO₂ (OSRAM, 2014a).

7.3 MERCURIO PRESENTE EN RESIDUOS

Por otro lado como se mencionó anteriormente, el mercurio, por la configuración misma de estos productos, mantiene un contacto con los diferentes elementos que componen la bombilla y pasan a ser contaminados. El convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades de la gestión de los residuos pos consumos de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias del ministerio de ambiente vivienda y desarrollo, muestra las cantidades aproximadas de mercurio que se pueden encontrar en los desechos de bombillos después de que se genera el rompimiento de estos y el mercurio gaseoso ha sido liberado. En la Tabla 5 se muestran los resultados de dicho estudio.

Tabla 5. Cantidad de mercurio contenido en los residuos de los bombillos según tecnología.

TECNOLOGIA		Mercurio (mg/unidad)	Plomo (mg/unidad)	Níquel (mg/unidad)
BFC Integral	Máximo	1,844		
	Mínimo	0,116		
	Promedio	0,98	379,07	140,64
BFC no Integral	Máximo	0,228	0,44	70,46
	Mínimo	0,027	0,4	0,53
	Promedio	0,095	0,42	24,17
BFT	Máximo	4,218	60,71	34,06
	Mínimo	0,021	0,21	0,8
	Promedio	1,225	25,52	12,35
Vapor de Mercurio	Máximo	15,764		
	Mínimo	1,05		
	Promedio	6,85	42,44	14,2

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

Como se puede apreciar la cantidad de mercurio, níquel y plomo se presentan con su promedio, máximo y mínimo, encontrados en los diferentes tipos de bombillo, siendo el promedio más alto el que corresponde a las lámparas de vapor de mercurio, mientras que las concentraciones más bajas se encuentran en las BFC no integrales.

8 CONSUMO

Se hace necesario además de estas especificaciones técnicas, el conocimiento de aspectos relacionados con el mercado. La cantidad de bombillos desechados, por ejemplo, es un parámetro sumamente importante cuando se habla de una cadena de pos consumo, ya que con base en esta se pueden modificar una gran cantidad de decisiones estratégicas.

Debido a que la diferenciación de desechos en el país se dificulta tanto y es difícil encontrar datos referentes a estos desechos, se decidió calcular la cantidad de

bombillos desechados basados en el consumo de estos productos y su vida útil real.

Para conseguir un estimado del consumo de bombillos para el año 2015, se tomó como base el estudio realizado por el Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No.031, en el que se presenta el volumen del consumo de bombillas diferenciado por tipo de tecnología para el año 2007.

Tabla 6. Cantidades de bombillos consumidos en año 2007 en Colombia por sectores.

	Residencial	Industrial	Comercial	Alumbrado público	Oficial	Otros	Total	Participación
Incandescentes	57.100.000	1.100.000	500.000	-	300.000	200.000	59.200.000	56,70%
BFC	7.800.000	1.200.000	1.500.000	-	600.000	800.000	11.900.000	11,40%
BFT	500.000	12.800.000	10.800.000	-	3.000.000	1.000.000	28.100.000	26,91%
Mercurio	-	300.000	200.000	800.000	-	40.000	1.340.000	1,28%
Sodio	-	-	-	2.400.000	30.000	40.000	2.470.000	2,37%
Haluros	-	200.000	900.000	-	200.000	100.000	1.400.000	1,34%
Total	65.400.000	15.600.000	13.900.000	3.200.000	4.130.000	2.180.000	104.410.000	
Participación	62,64%	14,94%	13,31%	3,06%	3,96%	2,09%	100%	

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

En el estudio mencionado se presentan tres escenarios posibles que estipulan el comportamiento de la demanda. Estos escenarios se presentan a continuación como condiciones (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

Condición I: Mercado normal. Tendencia al consumo normal definido por el mercado colombiano a través de las tasas de crecimiento de la población (1.6% anual) y del número de usuarios de electricidad (3% anual). La tecnología fluorescente compacta adquiere una participación por debajo de las expectativas

del programa de Uso Racional de Energía – URE. En cuanto a iluminación exterior, la tecnología mercurio es desplazada por la tecnología sodio.

Condición II: Sustitución de incandescentes. Aplicación del programa de sustitución de bombillas incandescentes y del Decreto 2331 del Ministerio de Minas y Energía como parte del programa URE; con esta condición, las bombillas fluorescentes compactas obtienen una participación mayor en el mercado a partir del año 2009, siendo obligatorio a partir del año 2011.

Condición III: Introducción tecnología LED. La tecnología LED desplaza a los sistemas incandescente y fluorescente debido a la reducción en los costos y a la optimización de sus diseños para elevar la potencia y eficacia como fuente de luz.

Teniendo en cuenta que al año 2013 las políticas de sustitución de tecnología de iluminación han sido implementadas, se decidió tomar los datos de la proyección como los resultados de la proyección del segundo escenario. Los valores de la proyección de consumo de bombillos para el mercado nacional diferenciado por sectores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Consumo de bombillas por sectores en Colombia

AÑO	RESIDENCIAL	INDUSTRIAL	COMERCIAL	ALUMBRADO PÚBLICO	OFICIAL	OTROS	Total
2007	65.400.000	15.620.000	13.950.000	4.180.000	2.150.000	3.500.000	104.800.000
2008	68.600.000	16.400.000	16.320.000	5.110.000	2.370.000	3.700.000	112.500.000
2009	71.500.000	17.200.000	17.620.000	5.770.000	2.630.000	3.900.000	118.620.000
2010	74.200.000	18.100.000	19.030.000	6.520.000	2.920.000	4.100.000	124.870.000
2011	77.300.000	19.000.000	20.550.000	7.370.000	3.240.000	4.300.000	131.760.000
2012	80.200.000	19.900.000	22.200.000	8.320.000	3.600.000	4.500.000	138.720.000
2013	83.600.000	20.900.000	23.970.000	9.410.000	3.990.000	4.700.000	146.570.000
2014	86.800.000	22.000.000	25.890.000	10.630.000	4.430.000	4.900.000	154.650.000
2015	90.400.000	22.000.000	27.960.000	12.010.000	4.920.000	5.200.000	162.490.000

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

En la proyección de datos encontrados en la documentación sólo se hace la diferencia por tecnología en el sector residencial, en el cual la sustitución de las bombillas incandescentes por las de base de mercurio será más marcada, debido a que ya desde 2007 el uso de bombillas a base de mercurio domina el resto de sectores.

La proyección de consumo de bombillos por tecnología y sector para los sectores restantes se realizó con base en la Tabla 6 y Tabla 7. Para el sector alumbrado público se proyectó una caída del uso de lámparas de mercurio del 0.5% anual y para el sector oficial se proyectó que en 2011 el número de bombillas incandescentes consumidas serian cercanas a cero, repartiendo su porcentaje de participación equitativamente entre las BFC y BFT.

La demanda encontrada de bombillos corresponde a la de Colombia, para estimar la demanda para la ciudad de Cali, se tomó como base para el cálculo el porcentaje del consumo de energía que pertenece a la ciudad de Cali (Cali en Cifras, 2011) frente a la del resto del país (SIEL, 2013). La Figura 5 muestra el consumo energético de Cali versus el del resto del país.

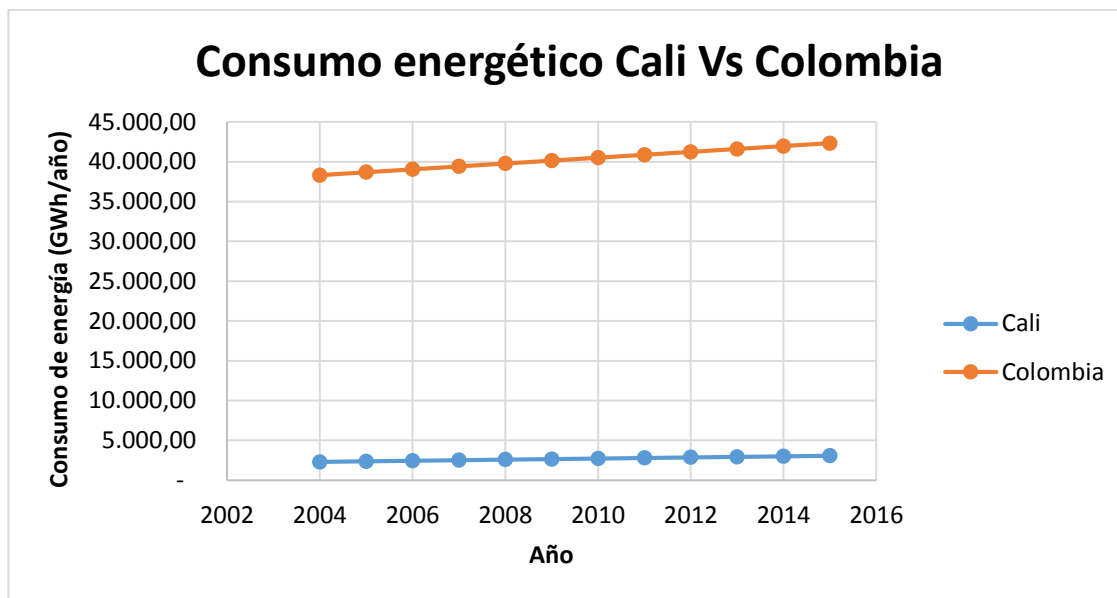


Fig. 5. Comparación entre el consumo energético proyectados de Cali vs Colombia. **Fuente:** (SIEL, 2013), (Cali en Cifras, 2011).

En la Tabla 8 observa cómo es la proporción del consumo energético de la ciudad de Santiago de Cali.

Tabla 8. Proyección de la participación de Cali en el Consumo energético de Colombia por años.

AÑO	PARTICIPACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO DE CALI
2004	6,00%
2005	6,12%
2006	6,25%
2007	6,37%
2008	6,49%
2009	6,61%
2010	6,73%
2011	6,84%
2012	6,96%
2013	7,07%
2014	7,17%
2015	7,28%

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa la participación de consumo energético de la ciudad de Santiago de Cali, irá en aumento progresivo con respecto al resto del país.

Los resultados de las proyecciones se muestran de las Tablas 9, 10, 11, 12, 13; para los sectores residenciales, industriales, comerciales, alumbrado público y oficial respectivamente.

Tabla 9. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector residencial

	RESIDENCIAL					
AÑO	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	3.333.059	624.550	210.308	-	-	-
2008	3.565.043	668.851	220.786	-	-	-
2009	2.519.328	1.970.498	238.047	-	-	-
2010	2.718.506	2.025.422	248.972	-	-	-
2011	848.589	4.174.511	266.895	-	-	-
2012	890.336	4.409.946	278.230	-	-	-
2013	946.876	4.663.716	296.782	-	-	-
2014	997.297	4.921.912	308.516	-	-	-
2015	1.055.816	5.198.984	327.667	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se puede observar que el sector residencial solo hace consumo de bombillos incandescentes, BFC y BFT, debido a su relación de beneficios y costos a diferencia de otros sectores. Además se presentará una preferencia por los BFC sobre los BFT como sustitución a los incandescentes.

La Tabla 10 muestra lo contrario; si se hace uso de dos tipos de tecnología adicional al sector residencial, esto se debe a las necesidades de iluminación en grandes espacios tanto abiertos como cerrados y se destaca el uso de bombillos tubulares gracias a su gran eficacia de potencia/iluminación.

Tabla 10. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector industrial

AÑO	INDUSTRIAL					
	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	70.192	76.574	816.785	19.143	-	12.762
2008	75.094	81.921	873.819	20.480	-	13.653
2009	80.197	87.487	933.197	21.872	-	14.581
2010	85.881	93.688	999.339	23.422	-	15.615
2011	91.685	100.020	1.066.878	25.005	-	16.670
2012	97.603	106.477	1.135.749	26.619	-	17.746
2013	104.136	113.603	1.211.769	28.401	-	18.934
2014	111.301	121.420	1.295.143	30.355	-	20.237
2015	112.956	123.225	1.314.402	30.806	-	20.538

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector comercial.

AÑO	COMERCIAL					
	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	31.979	95.938	690.756	12.792	-	57.563
2008	38.121	114.364	823.420	15.249	-	68.618
2009	41.910	125.731	905.263	16.764	-	75.439
2010	46.062	138.186	994.940	18.425	-	82.912
2011	50.587	151.762	1.092.689	20.235	-	91.057
2012	55.546	166.638	1.199.792	22.218	-	99.983
2013	60.927	182.782	1.316.028	24.371	-	109.669
2014	66.819	200.456	1.443.281	26.727	-	120.273
2015	73.234	219.702	1.581.854	29.294	-	131.821

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector de alumbrado público.

AÑO	ALUMBRADO PUBLICO					
	INCANDESCENTE	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	-	-	-	66.597	199.792	-
2008	-	-	-	81.298	250.530	-
2009	-	-	-	91.569	289.967	-
2010	-	-	-	103.101	335.628	-
2011	-	-	-	116.004	388.360	-
2012	-	-	-	130.212	448.507	-
2013	-	-	-	146.285	518.648	-
2014	-	-	-	163.976	598.705	-
2015	-	-	-	183.646	690.861	-

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de los sectores residencial, industrial y comercial; las proyecciones de alumbrado público apuntan al uso de bombillos de tecnología de sodio en su mayoría y en una menor proporción los de mercurio.

Tabla 13. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en el sector oficial.

AÑO	OFICIAL					
	INCANDESCENTE	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	9.953	19.906	99.529	-	995	6.635
2008	11.179	22.358	111.792	-	1.118	7.453
2009	12.632	25.265	126.324	-	1.263	8.422
2010	14.273	28.545	142.726	-	1.427	9.515
2011	-	40.265	169.115	-	1.611	10.737
2012	-	45.473	190.988	-	1.819	12.126
2013	-	51.200	215.041	-	2.048	13.653
2014	-	57.720	242.423	-	2.309	15.392
2015	-	65.057	273.241	-	2.602	17.349

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se presenta un cambio a partir del año 2011 donde se espera que ya no se mantenga el consumo de los bombillos incandescentes, hecho que hace que los BFC y BFT incrementen sus números un poco por encima del esperado.

Tabla 14. Proyecciones de la cantidad de unidades de bombillos consumidas en otros sectores.

	OTROS					
AÑO	INCANDESCENTE	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	15.202	60.806	76.008	3.040	3.040	7.601
2008	16.085	64.341	80.427	3.217	3.217	8.043
2009	17.593	70.371	87.963	3.519	3.519	8.796
2010	18.520	74.080	92.601	3.704	3.704	9.260
2011	20.091	80.364	100.454	4.018	4.018	10.045
2012	21.059	84.235	105.293	4.212	4.212	10.529
2013	22.690	90.759	113.449	4.538	4.538	11.345
2014	24.355	97.419	121.774	4.871	4.871	12.177
2015	26.053	104.212	130.265	5.211	5.211	13.027

Fuente: Elaboración propia.

En otros sectores se presenta consumo en todos los tipos de tecnologías, teniendo su pico entre los BFC y los BFT ya que son los bombillos destinados a mantener un ahorro económico pero con buena eficacia lumínica.

9 DESECHOS

Con base en el consumo estimado y la vida útil estimada presentada en la Tabla 15, fue posible proyectar la generación de desecho de bombillas para cada sector por cada año.

Tabla 15. Comparación entre vida nominal vs. vida real de los bombillos por tecnología

TIPO DE TECNOLOGÍA	VIDA NOMINAL (HORAS)	VIDA REAL AÑOS	No. DE BOMBILLAS REPOSICION AÑO
Incandescentes	900	0.45	2.222
BFC	6000	1.64	0.610
BFT	10000	6.64	0.151
Haluros	4000	5.98	0.167
Sodio	26000	3.56	0.281
Mercurio	16000	2.19	0.457
LED	25000	10.38	0.096

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

En la bibliografía, la vida real en años es calculada con base en la norma NTC 318-2004, que establece el número de ciclos por día, la relación de encendido apagado y un factor de daño para cada tipo de bombillo, como resultado se presenta el valor de duración de la vida real para cada tipo de tecnología (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

Posteriormente asumiendo una distribución de Weibull y utilizando la función acumulativa expresada en la ecuación (1), se pudo calcular la probabilidad de fallo para cada tipo de bombillo (Vásquez, C., et al., 2009).

$$f(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

Donde β es el parámetro de la forma que caracteriza la estructura del tiempo entre fallas y η es el parámetro de la escala y representa la vida característica del equipo, refiriéndose al tiempo en el cual se espera que el 63,2 % de las fallas ya hayan ocurrido en el equipo. $(t - t_0)$ representa el intervalo de tiempo transcurrido desde el momento en el que inicia el ciclo de vida del producto t_0 hasta el momento en el que se determina la probabilidad de falla (Vásquez, C., et al., 2009)

Al ser la distribución de Weibull una función bi-paramétrica es necesario estimar el valor de los parámetros de forma y de escala. (Palacio, Luis H., 2010). Para esto se tomaron como base los valores de probabilidad de falla presentados en la Tabla 16 y se utilizó la herramienta Solver de Excel para determinar el valor de los parámetros que aseguran una distribución de probabilidad que se asemeje a la presentada en la Tabla16.

Tabla 16. Probabilidad de falla.

TECNOLOGÍA	FALLO
Incandescente	55% al inicio del primer año y el 45% restante al finalizar el mismo.
BFC	36% en el primer año y el 64% restante en el segundo año.
BFT	10% en el primer año y 30% en los años 2, 3 y 4.
Haluros	10% en el primer año, 5% en los años 2 y 3, 20% en el año 4, y 60% en el año 5.
Sodio	10% en el primer año, 5% en el año 2, 10% en el año 3, y 75% en el año 5.
Mercurio	10% en el primer año 1, 20% en el segundo y el 70% restante en el año 3.
LED	10% en el año 1; 5% en los años 2, 3, 4 y 5; 10% en el año 6; 20% en el año 7; y 40% en el año 8.

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

La probabilidad de falla se calculó desde el año 1 hasta el año 8. Los resultados se muestran en la Tabla 17 junto con los valores de los parámetros donde se especifica la probabilidad de falla por año y por cada tipo de tecnología de bombilla.

Tabla 17. Probabilidad de falla estimada de los bombillos

	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
Beta	4.200	3.106	2.861	5.811	10.389	10.488
Teta	2.222	0.436	0.236	0.405	0.219	0.184
1 año	100.0%	7.3%	1.6%	0.5%	0.0%	0.0%
2 año	0.0%	40.7%	9.4%	25.1%	0.0%	0.0%
3 año	0.0%	42.0%	20.0%	70.0%	1.2%	0.2%
4 año	0.0%	9.6%	26.0%	4.4%	21.1%	3.7%
5 año	0.0%	0.4%	22.8%	0.0%	70.0%	30.1%
6 año	0.0%	0.0%	13.5%	0.0%	7.6%	60.0%
7 año	0.0%	0.0%	5.2%	0.0%	0.0%	6.0%
8 año	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%
9 año	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%

Fuente: Elaboración propia.

Ahora los resultados de los desechos de lámparas para cada tipo de tecnología diferenciados por sector se muestran en las Tablas 18, 19 y 20.

Se puede apreciar que la idea de hacer una transición de los bombillos incandescentes hacia los BFC y/o BFT, genera beneficios como ahorros energéticos; pero a la vez genera un mayor riesgo de contaminación dado que se aumenta la base de contaminación, para lo cual se deben planear sistemas de recolección y recuperación que garanticen que la nueva alternativa es mejor en todos los aspectos a la de los incandescentes. Ya que todos los desechos producidos por los bombillos incandescentes se generan en el mismo año en el que se consumen.

Tabla 18. Proyección de generación de desechos en el sector residencial

RESIDENCIAL						
AÑO	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	3.333.059	45.732	3.334	-	-	-
2008	3.565.043	303.238	23.225	-	-	-
2009	2.519.328	678.892	66.541	-	-	-
2010	2.718.506	1.291.454	125.187	-	-	-
2011	848.589	2.024.343	180.571	-	-	-
2012	890.336	3.064.822	219.798	-	-	-
2013	946.876	4.091.770	243.962	-	-	-
2014	997.297	4.519.603	260.925	-	-	-
2015	1.055.816	4.781.863	276.002	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el número de desechos producidos por cada tecnología tiene una tendencia creciente con una pendiente muy pronunciada hasta que a los años de 2011 y 2012 encuentran un crecimiento más estabilizado. Ya que se toman datos desde el 2007 y no se tienen en cuenta los desechos generados en ese año de bombillas compradas en años anteriores.

Tabla 19. Proyección de generación de desechos en el sector industrial

INDUSTRIAL						
AÑO	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	70.192	5.607	12.948	100	-	0
2008	75.094	37.173	90.459	4.904	-	0
2009	80.197	71.917	260.101	18.645	-	25
2010	85.881	84.242	490.792	20.785	-	502
2011	91.685	90.354	710.805	22.215	-	4.375
2012	97.603	96.564	869.820	23.767	-	12.336
2013	104.136	102.990	972.274	25.357	-	13.958
2014	111.301	109.806	1.048.783	27.014	-	14.920
2015	112.956	116.757	1.119.805	28.824	-	15.956

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Proyección de generación de desechos en el sector comercial

COMERCIAL						
AÑO	INCANDESCENTES	BFC	BFT	MERCURIO	SODIO	HALUROS
2007	31.979	7.025	10.951	67	-	0
2008	38.121	47.432	77.840	3.285	-	2
2009	41.910	96.059	229.726	12.862	-	113
2010	46.062	118.557	445.209	15.536	-	2.279
2011	50.587	131.508	663.390	17.131	-	20.014
2012	55.546	144.514	836.666	18.825	-	58.142
2013	60.927	158.692	964.192	20.673	-	70.581
2014	66.819	174.155	1.071.389	22.694	-	77.906
2015	73.234	191.018	1.178.377	24.892	-	85.600

Fuente: Elaboración propia.

10 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE BOMBILLOS A BASE DE MERCURIO

En el proceso de generar fuentes de energía y de iluminación mejores y más amigables con el medio ambiente, se han desarrollado diferentes alternativas de tratamiento con el fin de recuperar el mercurio pero que a su vez sea una solución económica.

10.1 DESMERCURIZACIÓN TÉRMICA

Es el proceso utilizado en la ciudad de Cali por la principal empresa de recolección de bombillos a base de mercurio. Consiste en el principio de destilación simple, generalmente utilizado en laboratorios químicos aplicado en la industria, que tiene un esquema de trabajo de cinco fases; las instalaciones físicas para el funcionamiento del equipo de desmercurización que es un espacio de 30 m^2 conformado con materiales impermeables y lavables, cuenta con dotación de optima iluminación, una campana de extracción para las emisiones con filtro de carbón activado, máquina de desmercurización, tanque de nitrógeno y agua y un recipiente receptor de residuos. El control de calidad se realiza periódicamente y el análisis de contenido de Mercurio en materiales resultantes de tratamiento. La planta cuenta con la Licencia Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.

El funcionamiento del equipo consta de una pieza principal del proceso es el equipo URL 2M diseñado para la extracción de mercurio, cuenta con cuatro patentes relacionadas con la máquina y sus detalles constructivos. El manejo de subproductos del proceso de desmercurización tiene un producto principal resultante que es el mercurio recuperado que resulta en cantidades muy pequeñas (INNOVA, 2008).

10.2 KAAP

En Alemania el proceso de tratamiento de bombillo se realiza a través del proceso denominado Kaap que se esquematiza en la Figura 6.

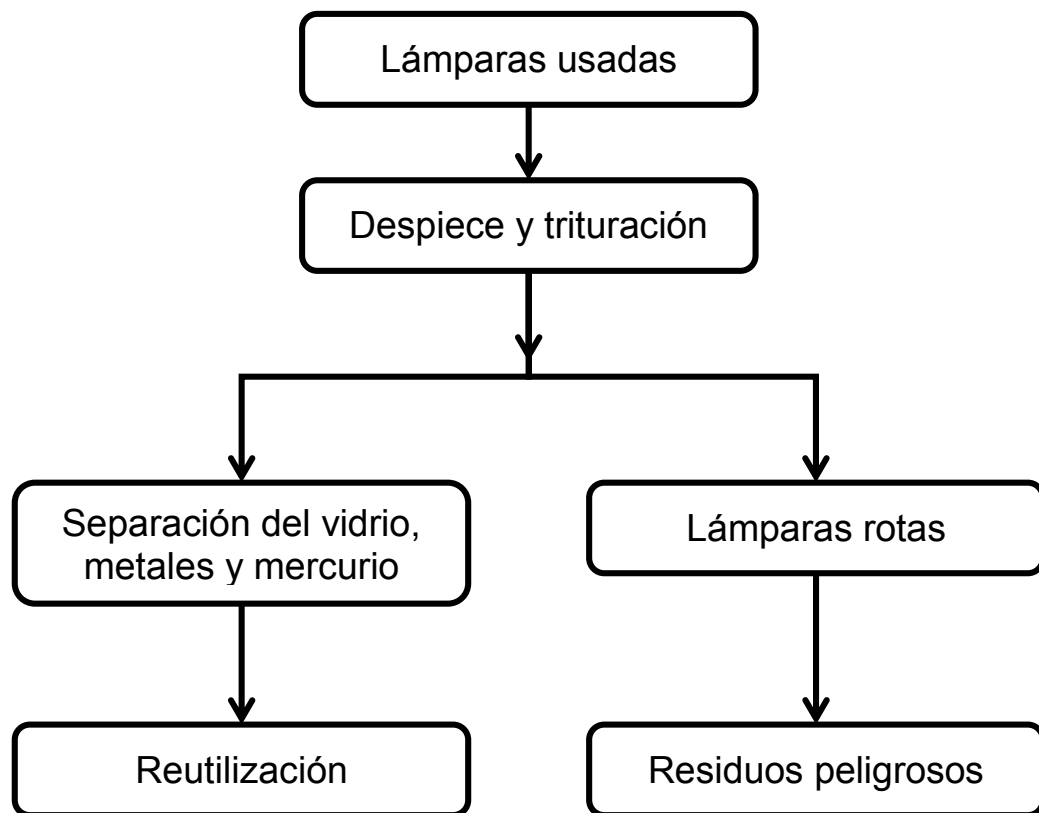


Fig. 6. Descripción del proceso de desmercurización térmica, Kaap. **Fuente:** (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008)

El esquema anteriormente mencionado es muy similar para los diferentes tipos de tratamiento que se le hace a este tipo de residuos utilizados por diversas empresas dedicadas la actividad de recuperación y tratamiento de residuos con contenido de mercurio. Posteriormente este proceso es complementado por el método Shredder (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008)

10.3 MÉTODO SHREDDER

Consiste en la remoción de residuos de mercurio a través de la utilización de aire caliente y posterior condensación, este proceso se lleva a cabo preferiblemente entre 100 y 200 grados centígrados con el objetivo de remover todo el mercurio contenido en los residuos. Este método permite procesar todos los tipos de

lámparas; se establecen tres pasos: Romper las lámparas, filtración por tamaños y se utiliza el reciclaje (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

10.4 CORTE Y SOPLADO

La tecnología de corte y soplado, es principalmente utilizada para el tratamiento de lámparas tubulares, consiste en el corte de los cabezales metálicos y posterior inyección de aire en las lámparas para extraer el polvo fluorescente que tiene un alto contenido de mercurio. Este procedimiento se puede completar con un proceso de triturado y posterior tamizado para separar los desechos de metal y vidrio.

Los residuos se separan y son sometidos a diferentes tratamientos que aseguran aproximadamente un 99% de la eficiencia en la recolección de mercurio. Los residuos pueden ser utilizados para la venta, por ejemplo el polvo fluorescente se utilizará posteriormente en la construcción de nuevas lámparas.

La capacidad estimada para este tipo de procedimientos alcanza un nivel de hasta 5000 lamp/horas. En la Figura 7 se puede esquematizar el proceso (MRT System, 2012).

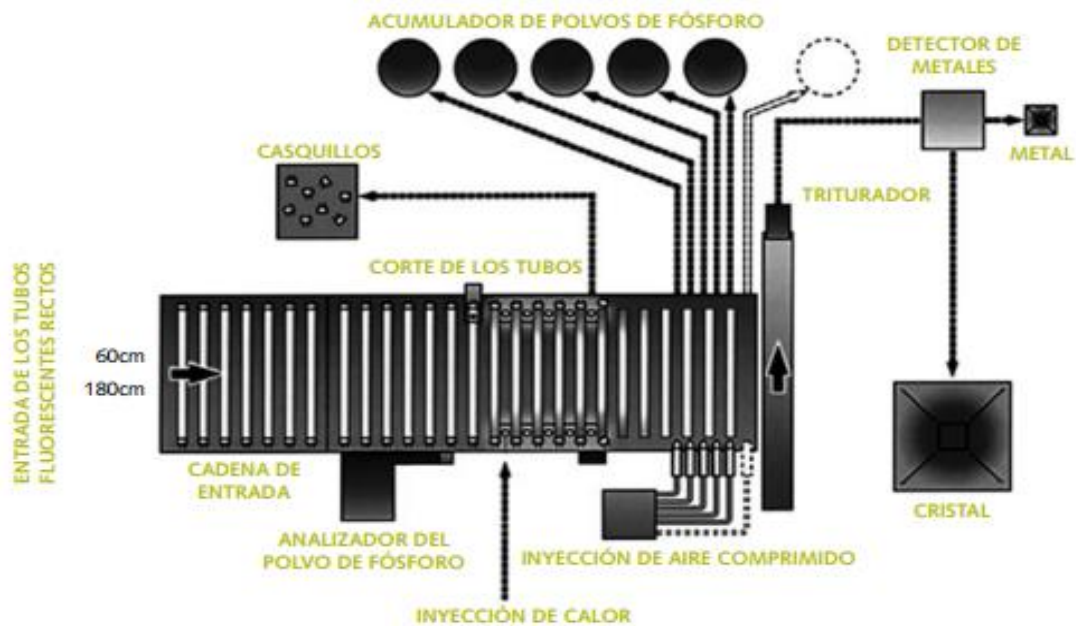


Fig. 7. Proceso con tecnología de corte y soplado. Fuente: (Ambilamp, 2005).

10.5 TRITURACIÓN Y SEPARACIÓN

Otra tecnología utilizada es la tecnología de trituración y separación utilizada principalmente para el tratamiento de LFC's y lámpara tubulares rotas. Este proceso consiste en el triturado de las bombillas y sus residuos bajo la utilización de vacío con el fin de atrapar el mercurio gaseoso liberado y posteriormente atraparlo y recuperarlo.

Como producto del proceso anterior se tiene una gran cantidad de desechos sólidos, es entonces necesario realizar la separación de éstos a través de tamices y otros procesos. Entre estos desechos sólidos se tienen el vidrio, metales y plásticos que estuvieron en contacto con el mercurio por lo que contiene todavía algunos rastros, sobre todo en el polvo fluorescente donde el contenido es alto. Es por esto que estos residuos pasan a una cámara en donde se aplica calor para generar la evaporación del mercurio y posterior condensación para su recuperación. En la Fig. 8 se puede apreciar el esquema del proceso. La

capacidad de este tipo de procesos alcanza hasta un nivel de 500kg/h. (MRT System, 2009)

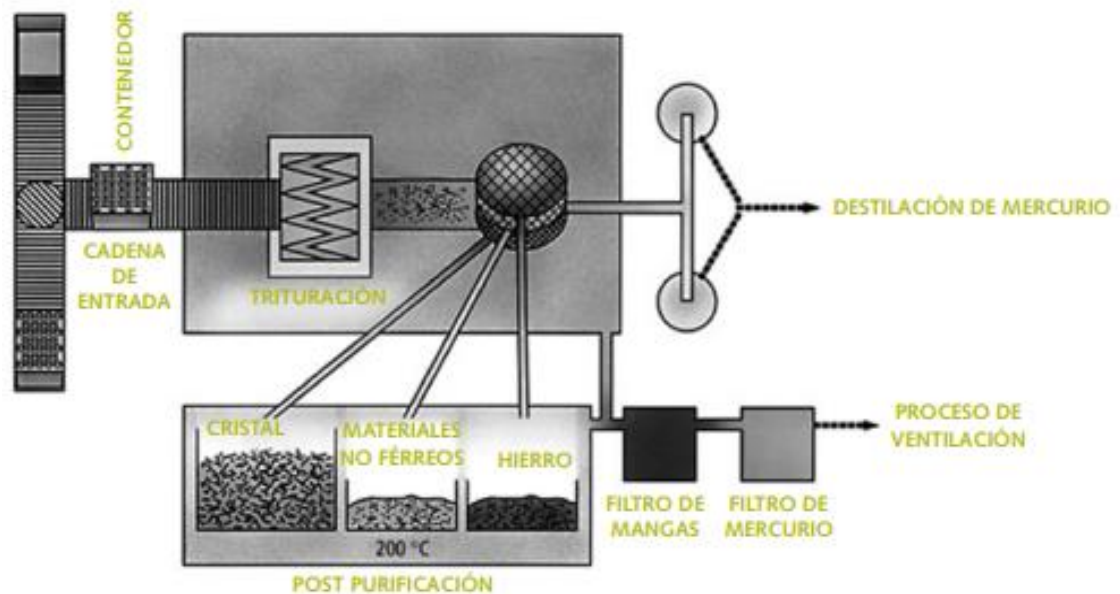
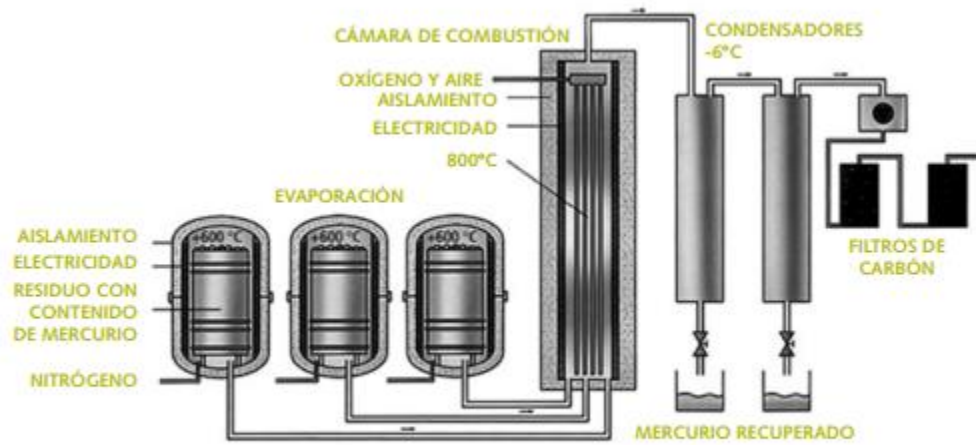


Fig. 8. Tecnología de trituración y separación. Fuente: (Ambilamp, 2005)

10.6 DESTILADOR DE MERCURIO

El destilado de mercurio es un proceso continuo que se utiliza en el tratamiento de polvo fluorescente, bombillas pre trituradas y otros residuos con bajo contenido de materia orgánica, en el cual el material se somete a calor hasta los 700°C dentro de un tambor de acero con el objetivo de evaporar los residuos de mercurio contenidos en los elementos mencionados, este mercurio evaporado pasa por un sistema de enfriamiento donde el mercurio se condensa para volver a su estado líquido y luego ser recolectado. Con este método se alcanzan purezas de mercurio de hasta el 99.99%.

Adicionalmente este proceso generalmente cuenta con una cámara de combustión, como se muestra en la Fig. 9, con la que se busca incinerar los residuos orgánicos y evitar la emisión de dioxinas a la atmósfera.



17

Fig. 9. Destilador de mercurio. Fuente: (Ambilamp, 2005)

El proceso de destilación de mercurio tiene 2 modalidades que están basadas en el procedimiento descrito anteriormente la diferencia radica el método de alimentación del proceso puede ser de alimentación continua o por lotes (Geymonat, 2011).

10.7 MÉTODO DE CORTADO FINAL

Es principalmente usado para las lámparas con forma de tubo. El proceso es continuamente desarrollado y hoy existen plantas de reciclaje que incluyen reciclaje de fosforo y entrada automática de lámparas. Las fases principales de este método son: Desarme de lámparas fluorescentes, eliminación de fosforo y recolección de vidrio. (Fachverband Elektrische Lampen, 2008)

10.8 MÉTODO DE LAVADO DE VIDRIO QUEBRADO

Es usado para reciclar grandes volúmenes de lámparas fluorescentes colectadas. Independientemente de su dimensión y diámetro el material de las lámparas fluorescentes, lámparas quebradas y producción expulsada puede ser reusada. Las principales fases de este método son: trituración de las lámparas fluorescentes, eliminación del fosforo, separación del material. (Fachverband Elektrische Lampen, 2008)

10.9 OTROS MÉTODOS DE REDISOLUCIÓN DE PRODUCTOS ESPECÍFICOS

Solo lámparas de tipo similar pueden ser procesadas usando métodos de redisolución de productos específicos. Las ventajas de este método es que el bombillo de la lámpara que contiene materiales peligrosos es separado desde la tapa y el mercurio es separado de todo el componente de la otra lámpara en la primera etapa del proceso. Se pueden obtener rendimientos más altos de reciclaje de vidrio. La desventaja es que la lámpara debe tener primero un gastado para ser separado manualmente. (Fachverband Elektrische Lampen, 2008)

10.10 MÉTODO CENTRÍFUGO DE SEPARACIÓN

El método centrífugo de separación permite lámparas fluorescentes compactas, lámparas de ahorro de energía y otra descarga de lámparas no tubulares para ser procesadas. Consiste en las siguientes fases: Desmote y separación de fracciones, fase de tratamiento térmico, fase de tratamiento magnético, utilización de reciclaje. (Fachverband Elektrische Lampen, 2008)

11 RECICLAJE Y DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA DE REVERSA DE BOMBILLOS

El proceso de reciclaje de lámparas a base de mercurio genera cuatro productos principales: polvo de fósforo contaminado por mercurio, filtros contaminados con mercurio, vidrio triturado y partes de aluminio. Esto se realiza mediante el proceso

de reciclaje en seco, que opera en el vacío, con la finalidad de reducir las emisiones de mercurio a la atmósfera, la principal actividad llevada a cabo en este proceso es la captura de mercurio en forma de vapor por filtros de carbón, que se utilizan para su posterior recuperación (Min Jang, *et al.*, 2005)

Muchos países europeos han promovido leyes que busquen la disminución de desechos motivados por metas ambientales. En Estados Unidos, la tendencia seguida es diferente y corresponde a motivaciones económicas (Fargher, 1996). Sin embargo este par de tendencias a menudo están entrelazadas y generan beneficios en conjunto, reducción de costos por un lado y oportunidades nuevas de mercado por el otro, además de los beneficios generados para el medio ambiente (Fleischmann *et al.*, 1997).

La administración del flujo de material opuesto a la cadena de suministro es preocupación de un campo recientemente emergido conocido como “logística reversiva” (Stock, 1992; Kopicky *et al.*, 1993). Según Fleischmann *et al.* (1997), las situaciones en las cuales se debe reutilizar son diversas y pueden clasificarse según el número de criterios, motivación del reúso, tipo de recolección de los desechos, forma en las que se va a reutilizar y actores involucrados; todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta en la planeación del problema y la formulación del modelo.

Aspectos de la logística convencional pueden ser adoptados por la logística reversiva para una gestión correcta. Primero, la localización de centros de acopio y el transporte de producto recolectado desde el sitio de disposición hacia el productor o hacia el centro de tratamiento, han sido estudiados utilizando modelos convencionales de logística. En segundo lugar, la inclusión de producto recuperado para el proceso de conversión de los desechos en productos que pueden ser usados nuevamente, puede ser tratada a partir de la gestión de inventarios. Por último, aunque no es una actividad logística en esencia, se tratan

aspectos relacionados con planeación de la producción (Fleischmann, et al., 1997).

11.1 LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE RECOLECCIÓN

Autores como Spengler, *et al.*, (1997) y Barros, *et al.*, (1998), han desarrollado modelos basados en recolección de residuos, principalmente para determinar aspectos de localización de los almacenes o centros de acopio, y la cantidad de éstos que se deben instalar. Esto con el fin de minimizar los costos relacionados con estas localizaciones.

La localización de los centros de acopio y plantas de tratamiento fueron incluidos como parámetros por Koo *et al.* (1991) que utilizó teorías difusas, junto con técnicas de optimización multi -objetivo para la planificación de las instalaciones de los centros de tratamiento de residuos peligrosos en países como Corea del Sur.

También existen publicaciones que desarrollan modelos donde se tienen en cuenta no sólo los almacenes y centros de acopio que deben ser abiertos, sino también qué capacidades para las distintas clasificaciones de residuos se debe tener, además la cantidad de material que debe ser transportado entre cada par de centros de acopio o destinos finales (Beamon, *et al.*, 2004).

Por otra parte el factor multiperiodo ha sido incluido en el problema de los centros de recolección y se ha estudiado el tiempo necesario de permanencia de los productos recolectados en los centros de recolección para lograr el mínimo costo posible (Min, H., *et al.*, 2006).

Otro enfoque tratado es la maximización del material recolectado, buscando disminuir el impacto ambiental. Parámetros tales como la variación del flujo de

recolección, la localización de los centros de recolección y su capacidad han sido incluidos en investigaciones (Biehl *et al.*, 2007). En este sentido Wojanowskiet *al.*,(2007; citado por Mutha y Pokharel 2009) desarrollaron un modelo estocástico que muestra que la accesibilidad de los clientes a los centros de recolección es fundamental para la rentabilidad de una iniciativa de logística reversiva.

Barker (2011), plantea un modelo multicriterio de logística reversiva (reciclaje) usando la herramienta AHP en el cual analiza las jerarquías de los criterios y subcriterios incluyendo aspectos como costos y relaciones de trabajo, y en él presenta que no solo se tiene en cuenta factores objetivos a la hora de seleccionar sitios de acopio, de pruebas y de procesamiento para los elementos reciclados. En este modelo presenta una forma para encontrar las interacciones y jerarquías entre varios factores de decisión de alto nivel que son difíciles de cuantificar.

11.2 TRANSPORTE DE MATERIAL RECOLECTADO

Para tratar el transporte del producto recolectado muchos autores han propuesto modificaciones del modelo tradicional de localización de planta (Mirchandani and Francis, 1989). Ginter y Starling, (1978) agregaron una característica especial a tener en cuenta, y es que la red va de muchos puntos a pocos puntos de demanda, en contraste con el modelo tradicional que va de pocos puntos a muchos puntos de demanda.

Al igual que en la logística convencional la minimización de las rutas para recolección ha sido estudiada (Schultmannet *al.*, 2006) y se han adicionado características adicionales tales como aspectos referentes al tamaño de los camiones que transportan residuos a los centros de tratamiento (Reimer *et al.*, 2006). En cuanto a este último aspecto, De Koster, de Brito, and van de Vendel (2002; citado por Mutha y Pokharel 2009) investigaron diferentes parámetros que modifican la red de recolección y recomiendan que los camiones que realizan la distribución deben ser los recolectan el producto devuelto.

En cuanto al transporte de residuos peligrosos, la inclusión del riesgo en la formulación del modelo es un aspecto que ha sido tratado con alguna relevancia. Zografos and Samara (1990) incluyen en su modelo tres objetivos, asociados a el riesgo en el transporte, el tiempo de viaje y el riesgo en la disposición.

11.3 INVENTARIO DE PRODUCTO RECOLECTADO:

Con respecto al inventario de productos que han sido recolectados, se requiere un mecanismo de control apropiado para integrar el flujo de producto recolectado en la planeación de materiales del productor; los métodos de gestión de inventarios tradicionales pueden ser adecuados (Fleischmann *et al.*, 1997).

Las compañías especializadas en reciclaje pueden manejar los inventarios de producto reciclado con un método de control de inventarios tradicional. Para empresas que toman productos usados por los clientes para crear nuevos productos la situación es diferente, debido a que no manejan volúmenes ni tratamientos iguales (Thierry, 1997).

El objetivo de la gestión de inventarios en organizaciones que utilicen logística reversa es controlar las órdenes de componentes externos y el proceso de recuperación de componentes internos para garantizar el nivel de servicio requerido y minimizar los costos fijos y variables (Dekker *et al.*, 2003). Autores como Schrady (1967) plantean un EOQ básico con demanda constante que incluye el flujo de recuperación de producto reciclado como constante. En adelante han sido incluidas modificaciones, tales como la posibilidad de múltiples tipos de productos reciclados (Mabini *et al.*, 1992) y variabilidad de la demanda y flujo de material recolectado, además de la posibilidad de procesar para llevar los productos reciclados a disposición (Cohen *et al.*, 1980).

11.4 PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN INCLUYENDO PRODUCTO RECICLADO:

En cuanto a la planeación de la producción, al incluir productos reciclados la decisión referente a las opciones de reúso tiene un gran peso en las investigaciones, al igual que la inclusión de parámetros como la calidad y cantidad de flujo de retorno. (Fleischmann, *et al* 1997)

Con base en lo anterior Franke, *et al.*, (2006) planteó un modelo de optimización para la planeación de la capacidad y programa de producción para la remanufactura de teléfonos celulares, considerando diferentes opciones de recuperación y reúso de los componentes recolectados.

11.5 OTROS ASPECTOS QUE CONFORMAN LA RED DE LOGÍSTICA REVERSIVA

Las investigaciones más recientes no se concentran en un solo aspecto, tratan también de abarcar todos los elementos que conforman la red de logística reversiva. Los elementos a tener en cuenta para desarrollar un modelo aplicado a la logística reversiva deben incluir el tiempo, la cantidad, la diversidad, la calidad, la recolección, el transporte, inspección, clasificación, y desensamble del producto retornado (García *et al.* 2013).

Un ejemplo de lo anterior se refleja en estudios basados en los residuos eléctricos y electrónicos que han sido ampliamente estudiados. Existen modelos que integran diversas partes del proceso de recolección, transporte y tratamiento de REE y busca la minimización de costos (Dat *et al.*, 2012).

La investigación de Pati *et al.*, (2006) consiguió un alcance más amplio al incluir variables de decisión que repercuten en la relación entre reducción de costo,

mejoramiento de la calidad del producto y beneficios económicos a través de la recolección de papel.

En muchas de las investigaciones recientes se han incluido modelos multiperiodo. Alumur *et al.*, (2012) desarrollan un modelo que incluye el factor dinámico de los periodos, además de la posibilidad de múltiples productos.

Algunos autores han incluido en sus investigaciones los residuos peligrosos como base para la modelación. Los problemas con respecto a la ubicación de almacenamiento de residuos y las instalaciones de tratamiento han sido investigados. Tung-LaiHu *et al.* (2002) plantean un modelo de minimización de costos de logística reversiva para el tratamiento de residuos peligrosos.

Como se puede ver, las investigaciones llevadas a cabo están referidas en su mayoría a adaptaciones de modelos de logística convencional al caso de logística reversiva, que progresivamente han incorporado nuevos parámetros. Sin embargo, muy pocos estudios han incluido problemas multiperiodo, aspectos ambientales y legislativos relevantes. Tampoco se han incluido la posibilidad de tercerización, la existencia de sistemas de logística inversa estatales, la ganancia en marketing por el desarrollo de perfiles ecológico. (Xanthopoulos, A. y Lakovou, 2010). La logística reversiva de residuos peligrosos garantiza más investigación. (Tung-LaiHu, *et al.*, 2002)

Más recientemente, Chaabane *et al.* (2012) presentan un modelo matemático de optimización para el diseño de la cadena inversa en la industria del aluminio. En su modelo, los autores buscan minimizar los costos totales de la logística de reversa, considerando igualmente restricciones de emisiones al medio ambiente. En otro artículo, Chen *et al.* (2014) discuten los factores de diseño y localización de centros de reciclaje de residuos municipales, concluyendo que las redes de reciclaje deberían ser diseñadas en varias etapas, de acuerdo con las

características de las basuras, la densidad de población y las demandas de las industrias en la región para minimizar los costos de reciclaje. Los aspectos anteriores han sido tenidos en cuenta para el desarrollo del modelo matemático que se presenta más adelante.

12 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MODELO DE RECOLECCIÓN

La cadena que representa el sistema a estudiar, ilustrada en la Fig. 10, está constituida por 8 niveles que representan las fases en los que se verá retenido el flujo físico de materiales ya sea para almacenamiento o por tratamiento. La conexión entre estos niveles se realiza a través de vehículos que cuentan con los requerimientos especificados por la legislación, exceptuando la conexión entre las plantas de tratamiento y el almacenamiento de producto tratado que se asumen están en el mismo lugar por lo que los costos de transporte son despreciables y si los hay están contemplados en el costo de mantenimiento de inventario.

Los consumidores de bombillos se encargan de llevar los desechos de bombillos que han llegado al final de su vida útil a los puntos de recolección, los cuales son utilizados como un almacenamiento temporal para el posterior transporte al centro de almacenamiento en el que se clasificarán los bombillos. A estos centros de almacenamiento llegarán además los desechos producidos por los clientes industriales.

Luego de esta clasificación se pasa directamente a los centros de tratamiento en los que se realizarán los procesos de recuperación y desactivación para los diferentes materiales contenidos en los bombillos, se manejará un costo de desactivación ya que la legislación colombiana prohíbe el desecho de estos bombillos sin tratar al relleno sanitario. Estos materiales pasaran entonces a un almacenamiento a la espera de ser demandados por los clientes. Está claro, como se muestra en la Tabla 21, que no todos los derivados del proceso son reutilizables. Una parte del producto procesado será destinado a clientes que

reutilizarán el material y la fracción restante (producto no reutilizable) será enviado a diferentes opciones de disposición final.

Tabla 21. Componentes aprovechables de los residuos de fuentes de iluminación

TECNOLOGIA	FRACCIÓN	CLASIFICACIÓN	
		POR POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO	POR PELIGROSIDAD
Incandescente	Cemento	No aprovechable	No peligroso
	Vidrio	Aprovechable	No peligroso
	Base metálica	Aprovechable	Peligroso
	Soldadura	Aprovechable	Peligroso
Fluorescente compacta integral	Componentes eléctricos	No aprovechable	No peligroso
	Plástico	No aprovechable	Peligroso
	Tarjeta electrónica	No aprovechable	Peligroso
	Base metálica	Aprovechable	Peligroso
	Vidrio	Aprovechable	Peligroso
Fluorescente compacta no integral	Metálicos	Aprovechable	No peligroso
	Plástico y cemento	No aprovechable	Peligroso
	Vidrio	Aprovechable	Peligroso
Fluorescente tubular	Tapas metálicas	Aprovechable	Peligroso
	Vidrio	Aprovechable	Peligroso
Haluro metálico	Vidrio	Aprovechable	No peligroso
	Fracción metálica	Aprovechable	No peligroso
	Cámara de mercurio	No aprovechable	Peligroso
	Soldadura	Aprovechable	Peligroso
Vapor de sodio	Cemento	No aprovechable	No peligroso
	Vidrio	Aprovechable	No peligroso
	Cámara de Amalgama	No aprovechable	Peligroso
	Base metálica	Aprovechable	Peligroso
	Soldadura	Aprovechable	Peligroso
Vapor de mercurio	Cemento	No aprovechable	No peligroso
	Vidrio	Aprovechable	No peligroso
	Fracción metálica	Aprovechable	No peligroso
	Cámara de mercurio	No aprovechable	Peligroso
	Soldadura	Aprovechable	Peligroso

Fuente: (Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031, 2008).

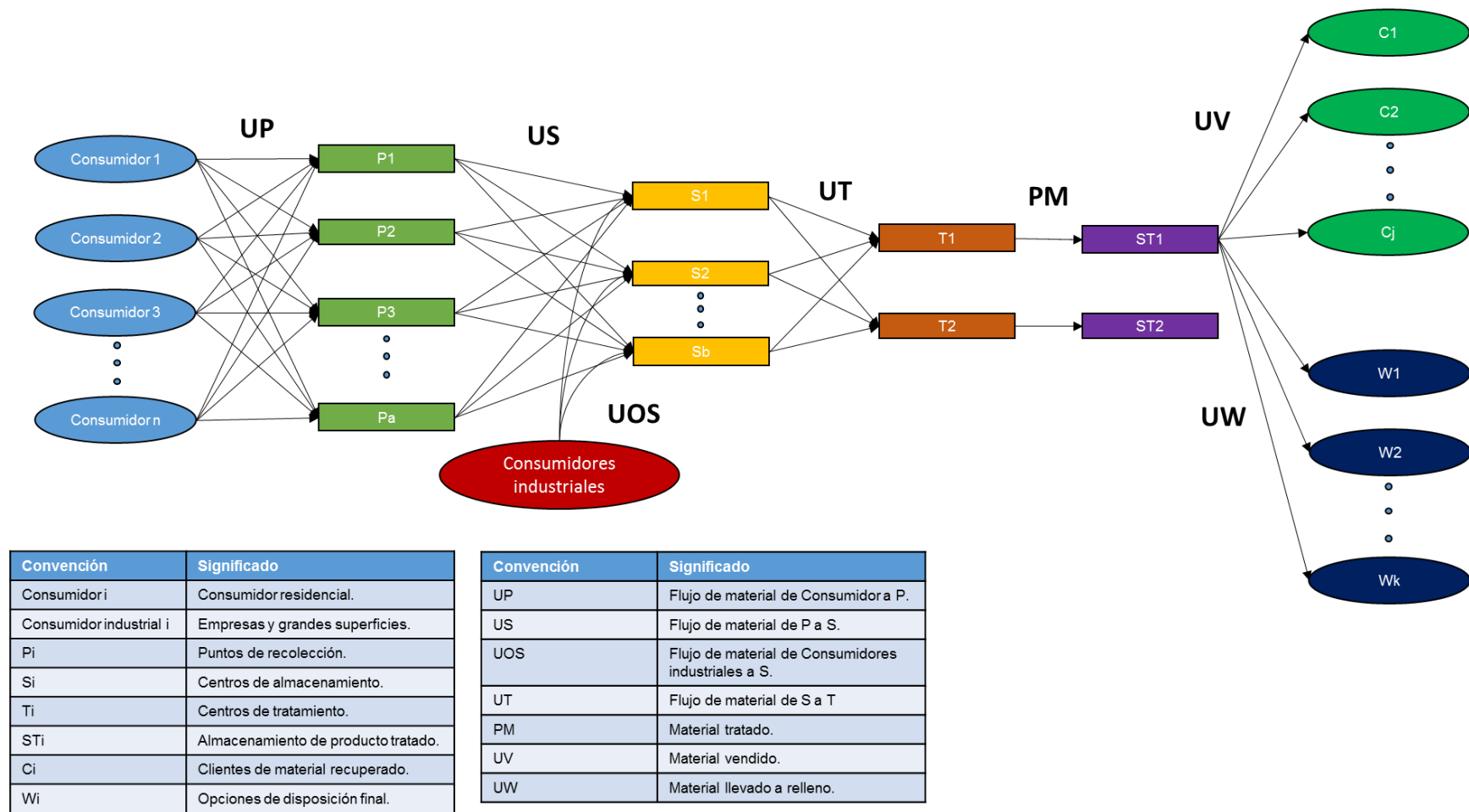


Fig. 10. Representación gráfica de la cadena de logística inversa. **Fuente:** Elaboración propia.

13 FORMULACIÓN DEL MODELO:

Con base en la cadena del sistema de recolección representado anteriormente fue posible identificar los costos más representativos en cada eslabón de la cadena. Estos costos pueden dividirse en cinco grandes grupos de costos:

1. Costos de recolección: Hacen referencia a los costos asociados a la gestión y manejo de los puntos de recolección que se distribuiría por la ciudad con el fin de servir como lugar de disposición de la población para deshacerse de los bombillos fuera de servicio.
2. Costos de transporte: Entre cada uno de los eslabones es necesario el transporte de productos. En este grupo se contemplan los costos de transporte desde los puntos de recolección a los centros de acopio y desde éstos hacia las plantas de tratamiento.
3. Costos de almacenamiento: Incluye los costos necesarios para el almacenamiento de producto, entre ellos el costo de apertura de los almacenes y los costos de ampliación de capacidad. De igual forma se incluyen los costos de manejo de inventarios. Se manejarán inventarios en los centros de acopio y en las plantas de tratamiento.
4. Costos de tratamiento: Se refiere a los costos de operación de la planta y se diferencian entre costos de tratamiento para reutilización o para llevar a relleno sanitario, de acuerdo con las leyes vigentes.
5. Costos de disposición: Son los costos asociados a los bombillos tratados para disposición e incorpora tanto los costos de transporte como los costos de disposición en los que se debe incurrir para disponer cierta cantidad de desechos en el sitio.

Adicionalmente, se presenta la existencia de una demanda determinada para cada uno de los materiales que se pueden recuperar en el proceso de tratamiento de los bombillos, por lo que se decidió incluir esta posibilidad de ingresos en función de la cantidad de bombillos a tratar y llevarlos a la función objetivo teniendo como

finalidad maximizar la utilidad bruta total obtenida por el desarrollo del proceso de recuperación de bombillos a base de mercurio.

Basados en lo anterior, la formulación verbal del modelo se presenta entonces de la siguiente manera:

Maximizar Utilidades Brutas Totales= Ventas – Costos de recolección – Costos de transporte – Costos de almacenamiento – Costos de tratamiento – Costos de disposición.

Sujeto a:

1. Apertura de puntos de recolección.
2. Capacidad de puntos de recolección.
3. Apertura de centros de acopio.
4. Capacidad de centros de acopio.
5. Legislación referente al almacenamiento de residuos peligrosos.
6. Capacidad de producción de las plantas de tratamiento.
7. Capacidad de almacenamiento de las plantas de tratamiento.
8. Emisiones de CO₂ causadas por las actividades de la cadena.

Para modelar la formulación anterior fue necesaria la definición de varios conjuntos, parámetros y variables que fueron utilizados para detallar con más profundidad los elementos comprendidos en el apartado anterior. Éstos se presentan a continuación.

CONJUNTOS

- B Conjunto de tipos de bombillo.
- C Conjunto de Comunas.
- CA Conjunto de Centros de Acopio.
- M Conjunto de Materiales a recuperar.

PR Conjunto de Puntos de Recolección.

PT Conjunto de Plantas de Tratamiento.

R Conjunto de Rellenos Sanitarios.

T Conjunto de periodos.

13.1 PARÁMETROS

CAP_{it} : costo fijo asociado a la apertura del punto de recolección i en el periodo t .

CAS_{jt} : costo fijo asociado a la apertura del centro de acopio j en el periodo t .

CN: Capacidad inicial del centro de acopio, capacidad con la que cuentan los centros de acopio al ser construidos, igual para todos los centros de acopio.

$CO2AC$: Factor para el cálculo de emisiones generadas por la apertura de un centro de acopio Basado en el consumo energético de un edificio amplio.

$CO2PT$: Factor para el cálculo de emisiones por unidad tratada en las plantas de tratamiento. Basado en el consumo energético promedio en el sector industrial (Cali en cifras, 2011)

$CO2T$: Factor para el cálculo de emisiones de CO_2 por unidad transportada por distancia entre puntos. Basado en las emisiones de un vehículo y la capacidad del mismo.

CPD_t : costo unitario de tratamiento para disposición en relleno sanitario en el periodo t .

CPR_t : costo unitario de tratamiento para reuso en la planta de tratamiento local en el periodo t .

CP_t : costo de cada unidad de capacidad para los puntos de recolección en el periodo t .

$CSPT_{mt}$: costo unitario de almacenamiento del material recuperado m en el periodo t .

CSS_j : costo unitario de capacidad adicional del centro de acopio j en el periodo t .

CST_m : Capacidad de almacenamiento del material recuperado m en la planta local. Fija para todos los periodos.

CS_t : costo de almacenamiento unitario en un centro de acopio en el periodo t .

CTS_{ijt} : costo de transporte unitario desde el punto de recolección i al centro de acopio j en el periodo t .

CTT_{jkt} : costo de transporte unitario desde el centro de acopio j a la planta de tratamiento k en el periodo t .

CTW_t : costo unitario de transporte y disposición desde la planta de tratamiento local al relleno sanitario en el periodo t .

$DMIN_{mt}$: Demanda mínima que se debe suplir para garantizar el funcionamiento de la planta. Basado en un porcentaje de la demanda del material m en el periodo t .

DM_{mt} : Demanda del material m en el periodo t .

DS_{ij} : Distancia entre el punto de recolección i y el centro de acopio j .

DT_{jk} : Distancia entre el centro de acopio j y la planta de tratamiento k .

$EMAX_t$: cantidad máxima de emisiones de CO_2 a producir en el periodo t .

ET_t : emisiones de CO_2 generada por los trasportes de material a través de la cadena en el periodo t .

EAS_t : Emisiones de CO_2 generadas por la actividad de los centros de acopio en el periodo t .

EPT_t : Emisiones de CO_2 generadas por la actividad de la planta local en el periodo t .

LCS : Límite de capacidad que se puede abrir para un centro de acopio, este límite es constante para todos los centros de acopio en todos los periodos.

LCP : Es la capacidad límite que se puede ampliar para un punto de recolección, este límite es constante para todos los puntos de recolección en todos los periodos.

MDO_t : Mínima cantidad de desechos que debe ser recuperada para los consumidores de los sectores industrial, comercial y oficial según la legislación vigente en el periodo t .

MD_t : Mínima cantidad de desechos que debe ser recolectada para los consumidores residenciales según la legislación vigente en el periodo t .

MDT_t : Mínima cantidad de desechos que debe ser tratada en las plantas de tratamiento en el periodo t .

PB_{it} : Participación del tipo de bombillo l en el total de los desechos de la ciudad en el periodo t .

PBN_l : Porcentaje de cada bombilla l que no puede ser recuperada para la venta.

PM_{ml} : Cantidad de material m que se puede extraer de cada unidad del tipo de bombillo l .

PV_{mt} : precio de venta unitario del material m en el periodo t .

CAT_k : capacidad de la planta de tratamiento k . Fijo en todos los periodos.

UO_{it} : cantidad de bombillos tipo l que se generan en el periodo t por los sectores industrial, comercial y oficial.

UPB_{icit} : unidades llevadas del tipo de bombillo l de la comuna c al punto de recolección i en el periodo t .

UP_{cit} : unidades totales llevadas de la comuna c al punto de recolección i en el periodo t .

13.2 VARIABLES DE DECISIÓN.

AP_{it} : 1 si se abre el punto de recolección i en el periodo t ; 0 de lo contrario. Variable de tipo binario.

AS_{jt} : 1 si se abre el centro de acopio j en el periodo t ; 0 de lo contrario. Variable de tipo binario.

$ECO2_t$: emisiones totales producidas por la actividad de la cadena en el periodo t .

PT_{mt} : La cantidad total de material m recuperado en el periodo t .

SA_{ijt} : Inventario del tipo de bombillo l almacenado en el centro de acopio j al final del periodo t .

SP_{it} : capacidad del punto de recolección i en el periodo t .

SS_j : capacidad adicional del centro de acopio j , constante en el tiempo y activado en el momento de la apertura.

ST_{mt} : inventario del material m en la planta de tratamiento local al final del periodo t .

UOS_{ijt} : unidades a recolectar de los demás sectores del tipo de bombillo l hacia el centro de acopio j en el periodo t .

USl_{ijt} : unidades del tipo de bombillo l a transportar del punto de recolección i al centro de acopio j en el periodo t .

UTD_{lt} : unidades del tipo de bombillo l a tratar para disposición en relleno sanitario en la planta local en el periodo t .

UT_{ijkt} : unidades del tipo de bombillo l transportadas desde el centro de acopio j a la planta de tratamiento k en el periodo t .

UTT_{lt} : unidades del tipo de bombillo l a tratar para recuperación de la planta local en el periodo t .

UV_{mt} : Unidades vendidas del material m posterior al tratamiento en el periodo t .

UW_{wt} : unidades transportadas desde la planta local al relleno sanitario w en el periodo t .

13.3 FUNCIÓN OBJETIVO

Como se mencionó anteriormente el objetivo del modelo es la maximización de la utilidad bruta resultado de la actividad de recolección y venta del material recuperado a lo largo de ocho periodos con duración trimestrales. Esta duración fue determinada con base en las restricciones asociadas al tiempo de almacenamiento de materiales peligrosos.

A continuación se muestran el beneficio y los costos incluidos en la función objetivo:

El beneficio viene dado por las unidades vendidas de cada material en el periodo t y el precio de venta de dichos materiales.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M UV_{mt} \times PV_{mt} \quad (2)$$

El costo total de capacidad de los puntos de recolección está determinado por el costo unitario y la capacidad a utilizar.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^J SP_{it} \times CP_t \quad (3)$$

El costo de apertura depende directamente de la variable binaria de apertura de puntos de recolección.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I AP_{it} \times CAP_{it} \quad (4)$$

El costo total de transportes hacia todos los centros de acopio y desde todos los puntos de recolección.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left(\sum_{l=1}^L US_{lijt} \right) \times CTS_{ijt} \quad (5)$$

El costo de almacenamiento para el periodo depende de la cantidad de bombillos del tipo l almacenadas en todos los centros de acopio que están activados.

$$\sum_{t=1}^T (CS_t \times \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L (SA_{ljt})) \quad (6)$$

Costo de apertura de los centros de acopio, garantiza que el costo de apertura solo se cobre una vez aún si el centro de acopio permanece abierto varios periodos.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J CAS_{jt} \times (AS_{jt} - AS_{jt-1}) \quad (7)$$

El costo total de transportar todas las unidades desde todos los centros de acopio y hacia todas las plantas.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\sum_{l=1}^L UT_{ljk} \right) \times CTT_{jkt} \quad (8)$$

Costo de tratamiento en la planta local, determinado por el total de bombillas que se envían a la planta local para tratamiento para reúso (8) y tratamiento para disposición (9).

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L UTT_{lt} \times CPR_t \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L UTD_{lt} \times CPD_t \quad (10)$$

Costo de disposición en los lugares de disposición final en función de las unidades tratadas para disposición y el material que no puede ser recuperado.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W UW_{wt} \times CTW_{wt} \quad (11)$$

El costo asociado al proceso de almacenamiento de los diferentes materiales que son recuperados en la planta de tratamiento local.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M ST_{mt} \times CSPT_{mt} \quad (12)$$

Por último el costo de capacidad adicional a construir en los centros de acopio que se causa una vez éste es construido. Este costo no depende del periodo pues la

capacidad adicional a obtener es fija para cada centro de acopio en el horizonte de planeación.

$$\sum_{j=1}^J SS_j \times CSS_j \quad (13)$$

Todos los elementos anteriores se incluyen en la función objetivo con la intención de maximización de la utilidad bruta, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \max \sum_{T=1}^N \left(\sum_{m=1}^n UV_{mt} \times PV_{mt} - SP_{it} \times CP_t \times \sum_{i=1}^n AP_{it} - \sum_{i=1}^n AP_{it} \times CAP_{it} \right. \\ - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^n US_{lijt} \right) \times CTS_{ijt} - CS_t \times \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n (SA_{ljt}) \\ - \sum_{j=1}^n CAS_{jt} \times (AS_{jt} - AS_{jt-1}) \\ - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\sum_{l=1}^n UT_{ljk} \right) \times CTT_{jkt} - \sum_{l=1}^n UTT_{lt} \times CPR_t \\ - \sum_{l=1}^n UTD_{lt} \times CPD_t - \sum_{w=1}^n UW_{wt} \times CTW_{wt} \\ \left. - \sum_{m=1}^n ST_{mt} \times CSPT_{mt} \right) - \sum_{j=1}^n SS_j \times CSS_j \end{aligned} \quad (14)$$

13.4 RESTRICCIONES:

Adicionalmente se desarrollaron las siguientes restricciones para el modelo que garantizan el funcionamiento coherente del sistema teniendo en cuenta las dificultades que representa el manejo de un desecho peligroso como lo es el de las bombillas.

Como primera medida, se debe asegurar que los centros de recolección abiertos en los distintos puntos de la ciudad sean los suficientes para cumplir con los mínimos legales exigidos por el gobierno para la cantidad de bombillos residenciales que van a ser recolectados.

$$\sum_{c=1}^C UP_{cit} \times AP_{it} \geq MD_t \quad \forall i, t \quad (15)$$

Además la capacidad de los puntos de recolección debe ser la suficiente para cumplir con estas limitaciones legales. Los costos asociados a la apertura de un punto de recolección y la capacidad de dichos puntos de recolección determinarán el equilibrio óptimo entre la cantidad de puntos y el tamaño de éstos. Adicionalmente se tiene que la capacidad del punto de recolección a adquirir debe ser menor a un límite de capacidad LCP.

$$SP_{it} \geq \sum_{c=1}^C UP_{cit} \times AP_{it} \quad \forall i, t \quad (16)$$

$$SP_{it} \leq LCP \quad \forall i, t \quad (17)$$

Como se muestra en el objetivo 1, cuando se caracterizaron los tipos de bombillos, cada uno de éstos tiene características especiales que se justifica llevar al modelo. La cantidad de bombillos diferenciada por tipo está dada por la proporción general que compone los desechos de la ciudad en el periodo t representada por PB_{lt} .

$$UPB_{lcit} = UP_{cit} \times PB_{lt} \quad \forall l, c, i, t \quad (18)$$

Ahora, trimestralmente la cantidad de bombillos de cada tipo que son dispuestos en un punto de recolección deben distribuirse en los centros de acopio en donde se realizará la selección de desechos y se almacenarán a la espera de su transporte a las plantas de tratamiento. No se mantendrá inventario en los puntos de recolección.

$$\sum_{c=1}^C UPB_{lcit} \times AP_{it} = \sum_{j=1}^J US_{lijt} \quad \forall l, i, t \quad (19)$$

De igual manera, los desechos producidos por el sector industrial, comercial y oficial deben ser recolectados para tratamiento y enviados a los centro de acopio. La cantidad de bombillos recolectados en cada periodo debe cumplir con el mínimo definido por la legislación y no puede superar la cantidad proyectada de generación de residuos para estos sectores.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J UOS_{ljt} \geq MDO_t \quad \forall t \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^J UOS_{ljt} \leq UO_{lt} \quad \forall t, l \quad (21)$$

SA_{ijt} representa el nivel de inventario al final del periodo t del tipo de bombillo l en el centro de acopio j y tiene en cuenta la cantidad de cada uno de los tipos de bombillos que llegan al centro de acopio desde los puntos de recolección, los otros sectores diferentes al residencial y la cantidad de bombillos que salen hacia las plantas de tratamiento. Esta es una restricción de balance de cada tipo de bombillo en cada centro de acopio y para períodos sucesivos.

$$SA_{ijt} = SA_{ijt-1} + \sum_{i=1}^I US_{lijt} + UOS_{ljt} - \sum_{k=1}^K UT_{ljk t} \quad \forall l, j, t \quad (22)$$

El flujo de bombillos que serán llevados hacia cada centro de acopio estará determinado por la decisión de apertura o no apertura de dicho centro de acopio. M es un número grande.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I US_{lijt} + \sum_{l=1}^L UOS_{ljt} \leq AS_{jt} \times M \quad \forall j, t \quad (23)$$

A pesar de que cada centro de acopio tiene una capacidad inicial, dada por CN , es posible que esta capacidad se amplíe con un costo de ampliación de capacidad determinado por CSS_j y limitada por un máximo de capacidad de ampliación definido con el parámetro LCS . La ampliación se realiza una sola vez y permanece constante en el horizonte de planeación.

$$CN + SS_j \geq \sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^n US_{lij t} + \sum_{l=1}^n UOS_{lj t} \quad \forall j, t \quad (24)$$

$$SS_j \leq LCS \quad \forall j \quad (25)$$

La cantidad de bombillos almacenados en el centro de acopio no deberían superar la capacidad de almacenamiento definida para éste.

$$\sum_{l=1}^n SA_{lj t} \leq CN + SS_j \quad \forall j, t \quad (26)$$

Una vez un centro de acopio ha sido activado en cualquier momento de tiempo no es posible cerrarlo.

$$AS_{jt-1} \leq AS_{jt} \quad \forall j, t \quad (27)$$

Dentro de las restricciones legales se encontró que cuando se trata de residuos peligrosos como bombillos es necesario que el tiempo de almacenamiento sea menor a 3 meses. Tomando como base periodos de evaluación (Time Steps) trimestrales, se puede decir que si se asegura que el material almacenado en el centro de acopio en el periodo $T-1$ es enviado hacia las plantas de tratamiento en el periodo T se cumplirá con esta restricción, haciendo el supuesto de un manejo de inventarios FIFO (primeros en entrar primeros en salir).

$$\sum_{k=1}^n UT_{ljk t} \geq SA_{lj t-1} \quad \forall l, j, t \quad (28)$$

Complementando las restricciones legales, también se requiere una cantidad mínima de unidades que deben ser enviadas a tratamiento durante cada periodo.

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n UT_{l j k t} \geq MDT_t \quad \forall t, \quad (29)$$

La cantidad enviada de cada uno de los tipos de bombillos desde los centros de acopio hacia las plantas de tratamiento debe obedecer a las limitaciones dadas por la capacidad de dicha planta. La capacidad de cada planta k está dada en el máximo número de unidades de entrada que puede manejar.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n UT_{l j k t} \leq CAT_k \quad \forall k, t \quad (30)$$

A pesar de que existen diversas opciones de plantas de tratamiento, el modelo se concentra en las operaciones de la planta que está disponible a nivel local. La posibilidad de enviar a otras plantas está dada por la necesidad de cumplir con las restricciones legales del proceso y la capacidad limitada de la planta local.

Después de que el producto es enviado hacia una planta externa se incurre en el costo de transporte pero este material ya no regresa por lo que no representa más costos ni beneficios que afecten la cadena de logística inversa. Los desechos que se envían a la planta local por el contrario, representan todavía costos de gestión y beneficios dados por la venta del material que resultará de su tratamiento.

Los bombillos enviados hacia la planta local pueden ser destinados a 2 procesos, ya sea tratamiento para reúso o tratamiento para su posterior disposición en los rellenos sanitarios. El índice $k=1$ utilizado al lado derecho de la igualdad hace referencia a que se tienen en cuenta solo las unidades enviadas a la planta local.

Estas restricciones representan ecuaciones de balance de flujo en la planta de tratamiento local, para cada tipo de bombillo y para cada período.

$$UTT_{lt} + UTD_{lt} = \sum_{j=1}^n UT_{lj1t} \quad \forall l, t \quad (31)$$

Cada uno de los tipos de bombillos enviados para tratamiento tiene una cantidad m de material recuperable, esta cantidad está representada por PM_{ml} . La cantidad total de material recolectado será determinada entonces por el tipo y flujo de bombillos que se enviarán a tratamiento. Estas restricciones representan el balance, en la planta local, de cada material obtenido a partir de todos los tipos de bombillos en cada período.

$$PT_{mt} = \sum_{l=1}^n UTT_{lt} \times PM_{ml} \quad \forall m, t \quad (32)$$

Los materiales obtenidos del proceso de tratamiento para reúso deben ser almacenados en la bodega de la planta de tratamiento. Estos materiales al ser materiales tratados no tienen restricciones de tiempo de almacenamiento. Esta cantidad de material almacenado en cada periodo será limitada por la capacidad misma de la bodega.

$$ST_{mt} = ST_{mt-1} + PT_{mt} - UV_{mt} \quad \forall m, t \quad (33)$$

$$ST_{mt} \leq CST_m \quad \forall m, t \quad (34)$$

De manera similar la cantidad de material recuperado en cada periodo no puede ser mayor que la capacidad de almacenamiento del almacén de producto terminado de la planta local.

$$PT_{mt} \leq CST_m \quad \forall m, t \quad (35)$$

Por otro lado la cantidad de bombillos que es llevada hacia los rellenos sanitarios está determinada por la cantidad de material que es enviada a tratamiento para disposición y la proporción en bombillos de material que no puede ser recuperado en el proceso.

$$\sum_{l=1}^n UTD_{lt} + \sum_{l=1}^n (UTT_{lt} \times PBN_l) = \sum_{w=1}^n UW_{wt} \quad \forall t \quad (36)$$

A pesar de que existe una demanda para los materiales recuperados que varía en el tiempo, no se hace necesario cumplir con toda esta demanda, pero si se hace imperante una cantidad mínima de unidades a tratar que aseguren la operación de la planta durante los periodos en evaluación.

$$UV_{mt} \leq DM_{mt} \quad \forall m, t \quad (37)$$

$$UV_{mt} \geq DMIN_{mt} \quad \forall m, t \quad (38)$$

Adicionalmente a pesar de los esfuerzos por generar una gestión responsable de los residuos, se hace evidente que se genera un impacto ambiental por el uso de transporte a base de combustibles fósiles y por el consumo energético requerido por la operación tanto de la planta de tratamiento como por los centros de acopio.

$$ECO2_t = ET_t + EAS_t + EPT_t \quad (39)$$

Las emisiones de CO2 emitidas al ambiente por los transportes tienen relación directamente proporcional a la cantidad de unidades transportadas a través de la cadena de logística inversa y la distancia entre los puntos de los eslabones. Los transportes desde la planta de tratamiento hacia el relleno sanitario no se incluyen pues si no se hiciera la actividad de recuperación este transporte existiría de igual manera.

$$ET_t = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\sum_{l=1}^n US_{lij t} \right) \times DS_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\sum_{l=1}^n UT_{ljk t} \right) \times DT_{jk} \right) \times CO2T \quad \forall t \quad (40)$$

Las emisiones generadas por los centros de acopio están ligadas las emisiones por periodo que se generan debido a la apertura éstos.

$$EAS_t = \sum_{j=1}^n AS_{jt} \times CO2AC \quad \forall t \quad (41)$$

Por último la cantidad de contaminación generada por la planta de tratamiento se relaciona con la cantidad de unidades que se tratan en la planta local.

$$EPT_t = \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n UT_{ljk t} \right) \times CO2PT \quad \forall t \quad (42)$$

Por último el total de emisiones debe mantenerse contralada para limitar el impacto ambiental que genera la operación de la cadena para que no se genere más impacto del que se está tratando de evitar. Para el caso de estudio se dejó esta última restricción abierta para observar el comportamiento del modelo.

$$ECO2_t \leq EMAX_t \quad \forall t \quad (43)$$

13.5 CASO ESTUDIO

El caso de estudio a tratar se concentra en la actividad de recolección de bombillas a base de mercurio que realiza LÚMINA en la ciudad de Cali, los desechos totales generados por el sector residencial están conformados por 5 tipos de bombillos: BFC, BFT (T5, T8, T12), Lámparas de mercurio. Cada uno de

estos tipos de bombillos tiene características propias como peso, volumen y composición de materiales.

La cantidad de residuos de bombillos generados por cada comuna se calculó con base en la generación total de la ciudad y la proporción poblacional que representa cada comuna (Cali en cifras, 2011). La probabilidad de llevar los desechos desde cada comuna hasta cada punto de recolección está determinada de forma lineal por la distancia existente entre la comuna y el punto de recolección, esto es a menor distancia la probabilidad de llevar los desechos de bombillos desde una comuna aumenta y por el contrario el punto de recolección que se encuentre a mayor distancia de la comuna contará con una probabilidad de 0% de ser utilizado por dicha comuna. La tabla 22 muestra los resultados del total de bombillos que llagan a cada punto de recolección desde todas las comunas en cada periodo.

Tabla 22. Total bombillos que llegan a cada punto de recolección desde todas las comunas

Periodo/PR (und)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	30.932	32.994	37.118	39.180	43.537	47.890	52.244	54.421
2	35.390	37.750	42.468	44.828	49.932	54.925	59.918	62.415
3	22.507	24.007	27.008	28.509	31.881	35.069	38.257	39.851
4	44.717	47.698	53.660	56.641	63.103	69.414	75.724	78.879
5	41.970	44.768	50.364	53.162	59.094	65.003	70.913	73.867
6	30.415	32.443	36.499	38.526	42.820	47.102	51.384	53.525
7	47.549	50.719	57.059	60.229	67.074	73.781	80.488	83.842
8	7.777	8.295	9.332	9.851	11.096	12.206	13.315	13.870

Fuente: Elaboración propia

Para el caso estudio se tienen en evaluación 8 puntos de recolección y 3 centros de acopio, en ambos casos con sus ubicaciones respectivas pre-establecidas y distribuidas por el mapa de la ciudad. En la imagen Fig. 11 muestra la localización de los puntos de recolección y las comunas en el mapa de Cali y la imagen Fig. 12 la localización de los centros de acopio.

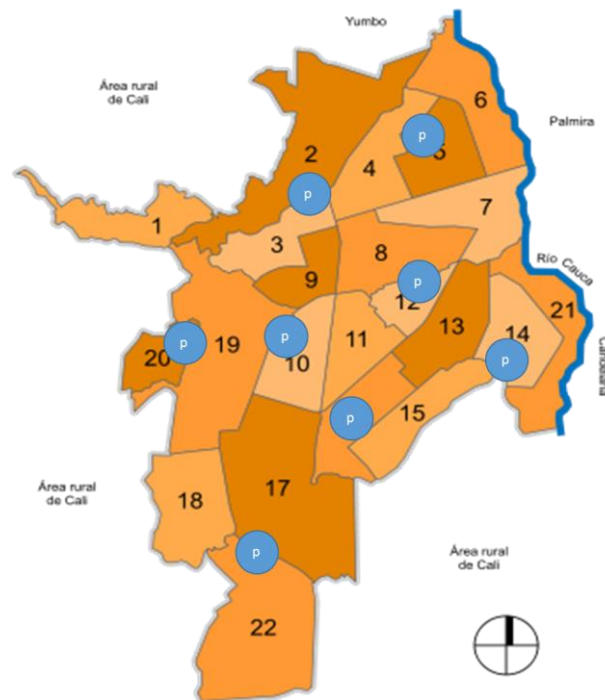


Fig. 11. Localización de puntos de recolección. Fuente: Elaboración propia.

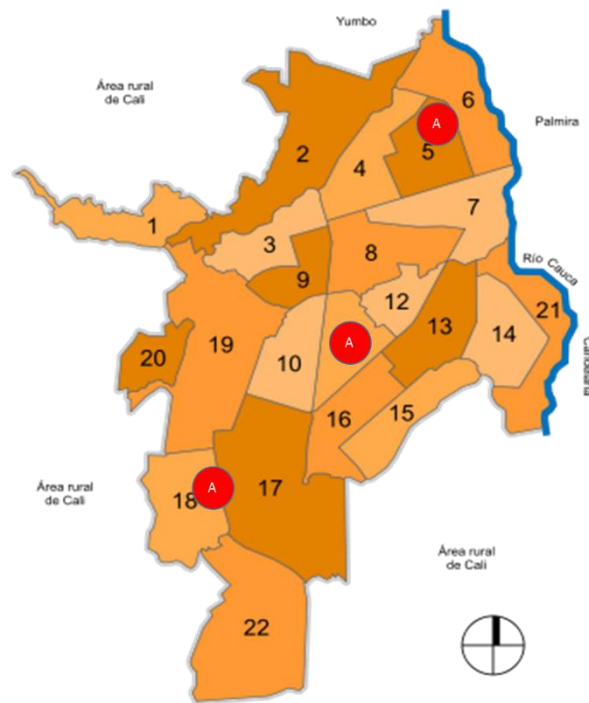


Fig. 12. Localización de centros de acopio. Fuente: Elaboración propia.

Las unidades deben ser llevadas a los centros de acopio y en este punto se toma la decisión de qué tipo de bombillos y cuantas unidades se llevan para tratamiento de reúso o para disposición en la planta local o si es necesario transportar bombillos hacia la planta externa. En las Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los costos de transporte desde cada centro de acopio hacia las plantas de tratamiento en cada periodo.

Tabla 23. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta local.

Planta de tratamiento local. (\$/und)								
CA	1	2	3	4	5	6	7	8
1	8,00	8,06	8,12	8,18	8,24	8,30	8,37	8,43
2	14,00	14,11	14,21	14,32	14,42	14,53	14,64	14,75
3	18,00	18,14	18,27	18,41	18,55	18,69	18,83	18,97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta externa.

Planta de tratamiento externa. (\$/und)								
CA	1	2	3	4	5	6	7	8
1	608	608	608	608	608	608	608	608
2	614	614	614	614	614	615	615	615
3	618	618	618	618	619	619	619	619

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla se realizó una penalización de alto costo al transporte de las unidades hacia la planta externa basado en la gran distancia a recorrer.

Existen 4 materiales que se pueden extraer del proceso de recuperación de bombillos: Vidrio, metal, mercurio y polvo de fósforo. Para cada tipo de bombillo la proporción de material con relación al peso total varía. Si se decide realizar el proceso para disposición no se obtienen materiales para reúso, pero si se decide realizar el tratamiento para reúso, los componentes no recuperables de igual forma deben ser llevados al rellenos sanitario. En la Tabla 25 se muestra la cantidad de material contenida por cada tipo de bombillo y el porcentaje del bombillo que no se puede recuperar.

Tabla 25. Costo de transporte unitario del centro de acopio a la planta externa. (gr)

Peso del material (gr)	BFC	T5	T8	T12	M
VIDRIO	38,1600	71,3900	123,9600	283	106,3500
METAL	5,7800	3,7900	6,0600	13,7200	27,0200
MERCURIO	0,0017	0,0015	0,0060	0,0220	0,0220
POLVO FOSFORO	3,4000	3,0000	8,0000	15,0000	15,0000
NO APROVECHABLE	31	1	3	-	28

Fuente: (M. Jang, *et al.*, 2005) (OSRAM, 2014)

Una vez se tienen los productos tratados, se almacenan para su posterior venta; las unidades que van para relleno sanitario son transportadas hacia 2 posibles rellenos.

El tiempo definido como entrada para el modelo se determinó como 2 años dividido en periodos trimestrales.

13.6 RESULTADOS:

El modelo propuesto se resolvió utilizando el software LINGO 14 en el que se formularon los conjuntos, restricciones y función objetivos mostrados con anterioridad. El número de variables, variables binarias y restricciones se pueden observar en la imagen Fig. 13.

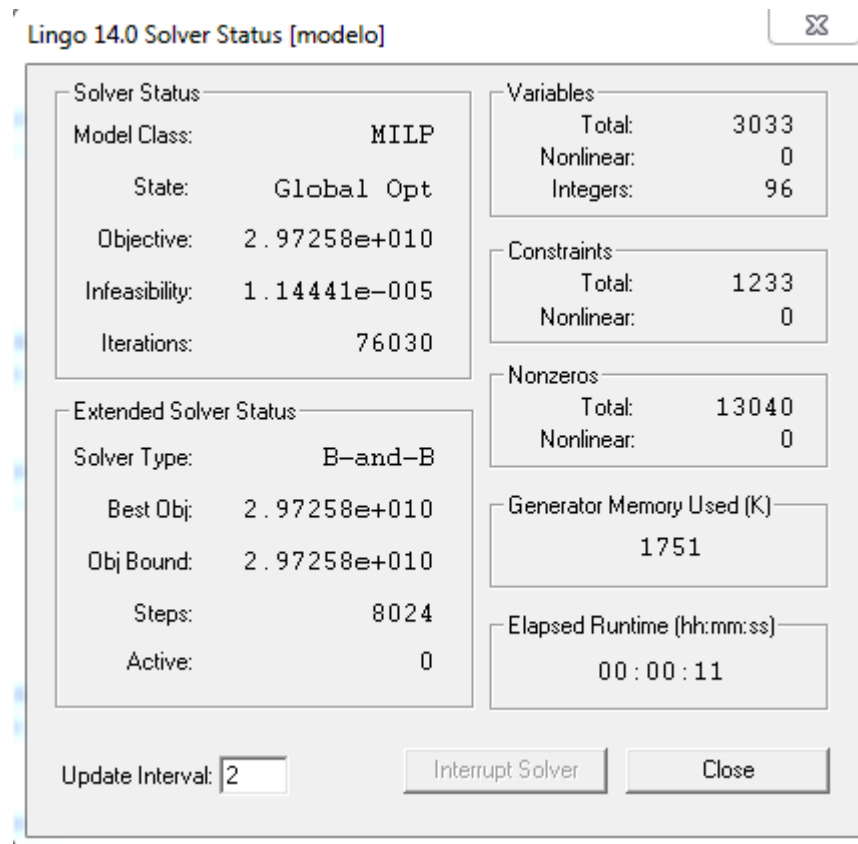


Fig. 13. Resultado corrida de modelo. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver es un modelo del tipo MILP (Mix Integer Linear Program) con un tiempo de resolución aproximado de 11 segundos.

Como resultado en la Tabla 26 se muestra la relación del valor obtenido para cada uno de los componentes que conforman la F.O. y el resultado de la F.O total. Los valores están presentados en pesos sobre todo el horizonte de planeación.

Tabla 26. Resultado desglosado de los componentes de la F.O

Componente de la F.O	Resultado.
(2)	\$ 33.062.591.652
(3)	\$ 1.496.661.619
(4)	\$ 36.247.098
(5)	\$ 3.910.824
(6)	\$ 489.620
(7)	\$ 230.000.000
(8)	\$ 964.112.325
(9)	\$ 328.527.188
(10)	\$ -
(11)	\$ 4.012.731
(12)	\$ 152.838.548
(13)	\$ 120.000.000
F.O	\$ 29.725.791.698

Fuente: Elaboración Propia.

La configuración que determinó el modelo para los puntos de recolección se muestra en la Tabla 27 En la que se muestra con valor de 1 cuales son los puntos de recolección que se abren en cada localización disponible para cada periodo. En la Tabla 28 la capacidad que se le asignó a cada punto en los diferentes periodos.

Tabla 27. Resultado para la apertura de puntos de recolección.

PR\Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-	-	1	1	1	1
2	1	1	-	-	1	1	-	1
3	1	1	1	-	1	-	-	-
4	1	-	-	1	1	-	1	-
5	-	1	1	1	-	1	-	-
6	-	1	1	-	-	-	1	1
7	1	-	1	1	1	1	1	1
8	-	1	1	1	-	1	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultado para las capacidades de los puntos de recolección.

PR/Periodo(und)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10.311	10.998	-	-	14.512	15.963	17.415	18.140
2	11.797	12.583	-	-	16.644	18.308	-	20.805
3	7.502	8.002	9.003	-	10.627	-	-	-
4	14.906	-	-	18.880	21.034	-	25.241	-
5	-	14.923	16.788	17.721	-	21.668	-	-
6	-	10.814	12.166	-	-	-	17.128	17.842
7	15.850	-	19.020	20.076	22.358	24.594	26.829	27.947
8	-	2.765	3.111	3.284	-	4.069	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en ningún periodo se realiza la activación de todos los puntos de recolección y se aprecia que para cada periodo varía el conjunto de puntos que se abren; esto debido a las fluctuaciones en los desechos producidos por las comunas en los diferentes periodos. En cuanto a las capacidades a

adquirir para los puntos de recolección, se generan cambios de periodo a periodo sin importar si estuvieron abiertos dos periodos consecutivos.

De igual manera en la Tabla 29 se relaciona la variable binaria para la apertura de centros de acopio junto con la capacidad adicional con la que se abrieron dichos centros.

Tabla 29. Resultado para la apertura de centros de acopio.

CA	Capacidad adicional (und)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100.000	1	1	1	1	1	1	1	1
2	100.000	1	1	1	1	1	1	1	1
3	-	-	-	-	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver los centros de acopio 1 y 2 se abren desde el inicio de los periodos de estudio utilizando la mayor ampliación posible en el centro 1 y 2, de esta manera el modelo intenta postergar lo más posible la apertura del centro 3 cuya característica especial en el costo de apertura es que disminuye a medida que avanza el tiempo. Además es la que presenta mayor distancia hasta las plantas de tratamiento.

A modo de resumen se muestra la cantidad total de todos los tipos de bombillos que se envía desde cada punto de recolección hacia cada centro de acopio y las cantidades que se recolectan de los otros sectores. Tabla 30 a 32. (La cantidad de unidades mostrada contiene la suma del total de los tipos de bombillos para facilidad de presentación de la información; si se requiere la información detallada estará disponible a petición del lector.)

Tabla 30. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 1 por periodo.

Centro de acopio 1 (und)								
PR	1	2	3	4	5	6	7	8
1	30.932	32.994	-	-	43.537	47.890	52.244	54.421
2	35.390	37.750	-	-	49.932	54.925	-	62.415
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	44.768	50.364	53.162	-	65.003	-	-
6	-	-	-	-	-	-	7.597	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
otros	133.678	84.488	149.636	146.838	106.532	32.182	140.159	83.165

Nota: El campo "Otros" hace referencia a los sectores industrial, comercial y oficial. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 31. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 2 por periodo.

Centro de acopio 2 (und)								
PR	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	22.507	24.007	27.008	-	-	-	-	-
4	44.717	-	-	56.641	63.103	-	75.724	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	32.443	36.499	-	-	-	43.788	53.525
7	47.549	-	57.059	60.229	67.074	73.781	80.488	83.842
8	-	8.295	9.332	9.851	-	12.206	-	-
Otros	85.227	135.254	70.102	73.279	69.823	114.013	-	62.633

Nota: El campo "Otros" hace referencia a los sectores industrial, comercial y oficial. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 32. Unidades enviadas hacia el centro de acopio 3 por periodo.

Centro de acopio 3								
PR	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	28.509	-	-	-	39.851
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
Otros*	-	-	-	53.755	100.000	79.270	72.820	60.149

Nota: El campo “Otros” hace referencia a los sectores industrial, comercial y oficial. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se puede apreciar para los centros de acopio 1 y 3 existe predominancia de unidades recolectadas de los sectores industrial, oficial y comercial, mientras que en la tabla 2 la mayoría de unidades provienen de los puntos de recolección. Esto se debe a que el centro de acopio 2 se encuentra en la mitad de la ciudad, entre los puntos de recolección, lo que lo hace preferente para transportar la mayor cantidad de unidades a éste.

En las tablas 33 y 34 se muestra la cantidad de unidades llevada desde cada centro de acopio hacia las plantas de tratamiento. (La cantidad de unidades mostrada contiene la suma del total de los tipos de bombillos para facilidad de presentación de la información, si se requiere la información detallada estará disponible a petición del lector.)

Tabla 33. Unidades enviadas hacia la planta de tratamiento local.

Planta de tratamiento local.								
CA	1	2	3	4	5	6	7	8
1	123.863	114.951	178.194	55.724	58.407	79.621	127.004	80.746
2	76.137	85.049	21.806	76.993	72.539	43.265	10.849	110.504
3	-	-	-	67.283	69.053	77.114	62.147	8.749
Σ	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Unidades enviadas hacia la planta de tratamiento externa.

Planta de tratamiento externa.								
CA	1	2	3	4	5	6	7	8
1	48.176	85.928	48.888	22.764	90.195	93.289	72.996	139.495
2	123.863	114.951	178.194	120.656	77.331	104.592	124.885	58.386
3	-	-	-	8.946	30.355	-	-	-
Σ	172.040	200.878	227.082	152.365	197.881	197.881	197.881	197.881

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que las unidades que se envían a la planta de tratamiento local obedecen a las limitaciones de capacidad de la planta que corresponden a 200.000 unidades trimestrales. Las unidades que se envían desde los centros de acopio hacia la planta externa responden a las restricciones legales de cantidades mínimas a tratar que no pueden ser suplidas sólo con la planta local. Estas unidades transportadas a la planta externa no se pueden recuperar y no es posible aprovechar el material tratado para la cadena local.

A continuación en la Tabla 35 se muestra como están distribuidos los tipos de bombillo que llegan a la planta de tratamiento local.

Tabla 35. Unidades llegadas a planta de tratamiento local.

Planta de tratamiento local.								
TB	1	2	3	4	5	6	7	8
1	55.851	26.199	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	144.14 9	148.94 7	187.57 3	200.00 0	200.00 0	141.69 7	27.015	-
4	-	-	-	-	-	32.447	146.12 7	186.57 1
5	-	24.854	12.427	-	-	25.856	26.858	13.429

Fuente: Elaboración propia.

Se observa predominancia en el tipo de bombillo 3 que corresponde a las lámparas T8 y son las lámparas tubulares con mayor participación en el mercado. La mayor parte de este tipo de bombillas llega desde los otros sectores y representa en general una fuente abundante de materiales recuperables.

Es posible observar en la Tabla 36_la cantidad de material recuperado y en la Tabla 37_la cantidad de material vendido en cada periodo.

Tabla 36. Material recuperado en la planta de tratamiento local.

Material recuperado (kg)								
Material	1	2	3	4	5	6	7	8
1	20.000	22.106	24.573	24.792	24.792	29.504	47.590	54.267
2	1.196	1.726	1.472	1.212	1.212	2.002	2.894	2.923
3	0,96	1,49	1,40	1,20	1,20	2,13	3,97	4,40
4	1.343	1.653	1.687	1.600	1.600	2.008	2.811	3.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Material vendido por periodo.

Material vendido (kg)								
Material	1	2	3	4	5	6	7	8
1	20.000	21.000	22.050	23.153	24.310	25.526	26.802	28.142
2	1.000	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
3	0,96	1,49	1,40	1,20	1,20	2,13	2,68	2,81
4	200	210	1.274	1.600	1.600	2.008	3.182	5.628

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el material 4 correspondiente a polvo de fósforo, a pesar de que se produce más de la cantidad mínima a vender se toma la decisión de almacenar el producto y realizar la venta sólo hasta los últimos periodos de estudio que es en los que se espera que exista un precio de venta mayor (el aumento de los precios fue calculado con el crecimiento de la inflación esperada para el 2014 en Colombia (Portafolio, 2013)).

Por otro lado para el mercurio que es el elemento número 3, se vende todo lo que se produzca en el periodo, esto debido al costo adicional que genera el almacenamiento de este material. (Costo supuesto que se definió superior al del resto de elementos debido a la necesidad de mantenerlo en estado líquido para almacenamiento (Convenio de cooperación científica y tecnológica No: 031, 2008)).

Adicionalmente la Tabla 38 muestra la cantidad de mercurio que se estaría recolectando por cada periodo como resultado de la actividad. (Basado en el total de unidades recolectadas en cada periodo).

Tabla 38. Mercurio total recuperado.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Mercurio (kg)	2,28	2,28	2,28	2,74	2,77	2,64	3,45	4,22

Fuente: Elaboración propia.

Por último se muestra la cantidad de emisiones que generadas en cada periodo diferencias por fuente en la Tabla 39.

Tabla 39. Emisiones de CO₂ generadas por la actividad.

Fuente	1	2	3	4	5	6	7	8
ET(kg)	10.672	11.788	12.677	11.260	12.801	12.450	11.994	11.614
EAS(kg)	4.800	4.800	4.800	7.200	7.200	7.200	7.200	7.200
EPT(kg)	39.000	39.000	39.000	39.000	39.000	39.000	39.000	39.000
CO2TOTAL(kg)	54.472	55.588	56.477	57.460	59.001	58.650	58.194	57.814

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior la participación mayor de emisiones la tiene el consumo energético de la planta de tratamiento local que está trabajando con la máxima capacidad utilizada (200.000 und/trimestre).

En cuanto a las emisiones totales, tomando como base el CMP (Concentración máxima permisible ponderada en el tiempo) el nivel de exposición permisible frente al mercurio es hasta 180.000 veces menor que el del CO₂, esto quiere decir que para el último periodo el impacto que genera sobre la salud humana 4,1 kg de mercurio es comparable a 738.000 kg de CO₂ (Estrucplan Consultora S.A, 1979). Por lo tanto con base en este indicador sería considerable la generación de emisiones para contrarrestar el impacto generado por el mercurio.

14 CONCLUSIONES

El mercado de iluminación en Colombia según las proyecciones obtenidas, tendrá un desarrollo importante en cuanto al consumo de luminarias a base de mercurio, lo que hace evidente la necesidad de desarrollar planes de contingencia para mitigar el impacto generado por la disposición equivocada de los desechos producidos por bombillos.

El modelo desarrollado presenta soluciones factibles para el caso estudiado mostrando como resultado la solución a un conjunto de variables que pueden resultar de gran importancia para el tomador de decisiones que se encuentra desarrollando un sistema de recolección de bombillos.

Realizando las modificaciones necesarias tanto en aspectos legales como técnicos, es posible adaptar el modelo a cualquier tipo de desecho que requiera tratamiento y tenga posibilidad de recuperación de los materiales o componente que lo constituyen.

El número de variables crece considerablemente al aumentar la cantidad de puntos de recolección, periodos, centros de acopio o materiales, ocasionando que el tiempo computacional requerido para la solución aumente en gran proporción según se amplifique el alcance del modelo. De igual manera a medida que se ajustan las restricciones el número de iteraciones necesarias para la resolución del modelo es muchos más grande.

El modelo presentado da al tomador de decisiones la posibilidad de conocer la configuración óptima para la cadena de logística inversa sin descuidar el impacto que se generaría en el ambiente por el desarrollo de las actividades de la cadena.

15 BIBLIOGRAFÍA

Alcaraz, V.M.; Colotta, V.A. y Laties, V.G. (1983). Drogas y conducta. Ed. Trillas. México p.299-811.

Ambilamp. (2005). MANUAL DE LA DIRECTIVA RAEE SOBRE RECOGIDA Y RECICLADO DE LÁMPARAS (REAL DECRETO 208/2005). Obtenido en http://www.ecotic.es/files/RAEE_lamparas_folleto_AMBILAMP_1.pdf

Barker, T., and Zabinsky, Z., (2011). A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. Omega 39(5):558-573.

Barros, A. I., Dekker, R., & Scholten, V. (1998). A two-level network for recycling sand: A case study. European Journal of Operational Research, 110, 199–214.

Beamon, B.M. and Fernandez, C., 2004, Supply chain network configuration for product recovery, Production Planning and Control, 15(3), pp. 270–281.

Biehl, M., Prater, M., & Realff, M. J. (2007). Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems. Computers and Operations Research, 34, 443–463.

Cali en Cifras (2011). Estadísticas de la ciudad de Cali. Poblacionales. Departamento Administrativo de Planeación.

Casas, Jose, Cerón Katherine. (2013). MÉTODO CUANTITATIVO PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA CADENA DE LOGÍSTICA INVERSA DE UN TIPO DE RESIDUO DE APARATO ELÉCTRICO O ELECTRÓNICO. Universidad del Valle.

Cohen, M.A., Nahmias, S., Pierskalla, W.P., 1980. A dynamic inventory system with recycling. *Naval Research Logistics Quarterly* 27 (2), 289-296.

Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica No. 031 MAVDT – UN, 2008. “Convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades relacionadas con la gestión de los residuos posconsumo de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias, Tomo I: fuentes de iluminación (lámparas / bombillas)”.

Coopersmith, 1990 J.A. Coopersmith Many happy returns *Catalog Age*, 7 (10) (1990), pp. 93–94.

Dat, L.Q., Doan Thi Truc Linh, Shuo-Yan Chou, Vincent F. Yu. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products *Expert Systems with Applications*, 39 (7), PP. 6380–6387

Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, k., Van Wassenhove, L.N., 2003. *Stochastic Inventory Control for Product recovery Management; Reverse Logistics Quantitative models for Closed-Loop supply chain*, Springer, pp. 182-220.

El Espectador, El peligro de los bombillos ahorradores. [En línea]. Septiembre 2012. Disponible en Internet: <http://www.elespectador.com/impreso/vivir/articulo-372360-el-peligro-de-los-bombillos-ahorradores>.

Estefanía Geymonat, 2011. Proyecto para el manejo racional de productos con Mercurio en Uruguay. Obtenido de <http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/Tratamiento-t%C3%A9rmico-para-la-recuperaci%C3%B3n-de-mercurio-Diciembre-2011.pdf>

Estrucplan Consultora S.A. (1979). Obtenido de República Argentina Decreto N° 351/1979 Anexo III Correspondiente al art. 61 CAPITULO IX: <http://www.estrucplan.com.ar/Legislacion/Nacion/Decretos/Dec00351-79-Anexo3.htm>

Fachverband Elektrische Lampen, Z. E. (Marzo de 2008). OSRAM. Obtenido de <http://www.osram.com/media/resource/HIRES/338017/1127407/collection-and-recycling-of-discharge-lamps.pdf>

Fargher Jr., J.S.W. (Ed.), 1996. Remanufacturing Resource Book. APICS, Falls Church, VA.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E.E., Van Wassenhove, L.N. (1997) Quantitative models for reverse logistics: A review. European Journal of Operational Research, Volume 103, Issue 1, 16 November 1997, Pages 1–17

Franke, C., Basdere, B., Ciupek, M., & Seliger, S. (2006). Remanufacturing of mobile phones-capacity, program and facility adaptation planning. Omega, 34, 562–574.

Garcia-Rodrigues, F., Castilla-Gutierrez, C., Bustos-Flores, C. (2013). Implementation of reverse logistics as a sustainable tool for raw material purchasing in developing countries: The case of Venezuela. International Journal of Production Economics, 141 (2), pp. 582-592.

Ginter, P.M., Starling, J.M., 1978. Reverse distribution channels for recycling. California Management. Review 20 (3), 73-82.

Hernández, A., Zalasar, M., 2011. Gestión posconsumo de residuos peligrosos: BOMBILLAS Y COMPUTADORES. Universidad Tecnológica de Pereira.

INNOVA Ambiental. (2014). Método de desmercurización. Obtenido de <http://www.innovaambiental.com.co/mercuriales.htm>

Koo, J.K., Shin, H.S., Yoo, H.C., 1991. Multi-objective siting planning for a regional hazardous waste treatment center. *Waste Management and Research* 9, 218–250.

Kopicky, R.J., Berg, M.J., Legg, L., Dasappa, V., Maggioni, C., 1993. Reuse and Recycling: Reverse Logistics Opportunities. Council of Logistics Management, Oak Brook, IL.

Ley 253, Diario Oficial de la Republica de Colombia No.42.688, Santafé de Bogotá, Colombia, 17 de enero de 1996.

Luzete. (s.f.). Obtenido de <http://www.luzete.es/regulacion-consumo>.

Lúmina. (2014). Obtenido de <http://lumina.com.co/index.php/por-que-lumina/legislacion.html>

Mabini, M.C., Pintelon, L.M., Gelders, L.F., 1992. EOQ type formulations for controlling repairable inventories. *International Journal of Production Economics* 28, 21–33.

Min Jang, S.M. Hong, J.K. Park., 2005 Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps; *Waste Manage.*, 25 , pp. 5–14.

Min, H., Ko, H.-J., & Ko, C.-S. (2006b). The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network. *Computers and Industrial Engineering*, 51, 309–320.

Mirchandani, P.B., Francis, R.L., 1989. *Discrete Location Theory*. Wiley, New York.

Mutha, A., Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules *Computers and Industrial Engineering*, 56 (1), pp. 334-346.

MRT System. (2012). MRT End Cut Machine. Obtenido de http://www.mrtsystem.com/wpcontent/uploads/2013/05/End_Cut_Machine_for_lamp_recycling.pdf

MRT System. (2009). MRT Lamp Processor. Obtenido de <http://www.mrtsystem.com/wp-content/uploads/2013/05/Lamp-Processor-for-lamp-recycling.pdf>

OSRAM. (4 de Mayo de 2014). Obtenido de http://www.osram.com/osram_com/products/lamps/compact-fluorescent-lamps/osram-dulux-intelligent/osram-dulux-intelligent-facility/index.jsp

OSRAM. (2014). Why is mercury necessary for fluorescent lamps?. Obtenido de http://www.osram.com/osram_com/sustainability/sustainable-products/sustainability-criteria/key-performance-indicators/mercury/why-mercury/index.jsp

OSRAM. (2014a). Sustainability Criteria - Key Performance Indicators. Obtenido de http://www.osram.com/osram_com/sustainability/sustainable-products/sustainability-criteria/key-performance-indicators/mercury/why-mercury/index.jsp

Palacio, Luis H., (2010). Cálculo de los Parámetros de la Distribución de Weibull. Obtenido en <http://confiabilidad.net/articulos/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull/>

Pati, R., Vrat, P., & Kumar, P. (2006). A goal programming model for paper recycling system. *Omega*. doi:10.1016/j.omega.2006.04.014.

Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente, 2002. Evaluación mundial sobre el mercurio.

Reimer, B., Sodhi, M., & Jayaraman, V. (2006). Truck sizing models for recyclables pick-up. *Computers and Industrial Engineering*, 51, 621–636.

Schrady, D.A., 1967. A deterministic inventory model for repairable items; *Naval Research Logistics Quarterly* 14, pp. 391- 398.

Schultmann, F., Zumkeller, M., & Rentz, O. (2006). Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 171, 1033–1050.

SIEL. (2013). Tablas cifras proyección demanda eléctrica julio 2013. Obtenido en http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/TABLAS_CIFRAS_PROYECCION_DEMANDA_ELECTR_JULIO_2013.xls

Spengler, T., Puchert, H., Penkuhn, T., & Rentz, O. (1997). Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97, 308–326.

Stock, J.R., 1992. Reverse Logistics. Council of Logistics Management, Oak Brook, IL.

Thierry, M.C., 1997. An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.

Tung-Lai Hu, Jiu-Bing Sheu, Kuan-Hsiung Huang, (2002). A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes; Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 38, Issue 6, November 2002, pp. 457-473.

Universidad Nacional de Colombia, Colombia prepara planes posconsumo para pilas y bombillas. [En línea]. Bogotá (Colombia). Febrero 2010. Disponible en Internet: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/detalle/article/colombia-prepara-planes-posconsumo-para-pilas-y-bombillas/>.

Vásques, C., Osal, W., Briceño, F., Blanco, C. (2009). Índice de importancia, probabilidad de falla y confiabilidad de los componentes de las líneas áreas de distribución. Publicaciones en Ciencias y Tecnología. Vol 3, 2009 N0 1, pp.5–13.

Xanthopoulos, A., Lakovou, E., 2010. Design of Reverse Supply Chains in Support of Agile Closed-loop Logistics Networks; Enterprise Networks and Logistics for Agile Manufacturing, Springer, pp. 271-296.

Zografos, K.G., Samara, S.S.A., 1990. Combined location-routing model for hazardous waste transportation and disposal. Transportation Research Record 1245, 52–59.