

Sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Enfoque de dinámica de sistemas

Management system of waste electrical and electronic equipment. System dynamics approach

Luz Angélica Rodríguez B.

angelica.rodriguez@escuelaing.edu.co

Nicolás González E.

nicolas.gonzalez@escuelaing.edu.co

Lorena S. Reyes R.

lorena.reyes@mail.escuelaing.edu.co

Andrés F. Torres R.

andres.torres-r@mail.escuelaing.edu.co

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito - Bogotá, Colombia

.....
Fecha de recepción: Enero 10 de 2013

Fecha de aceptación: Febrero 26 de 2013

Palabras clave

RAEE; AEE; dinámica de sistemas; gestión integral.

Keywords

WEEE; EEE; system dynamics; integrated management.

Colciencias tipo 1

Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por la financiación de este proyecto y a la Asociación de Recicladores Informales [ASOCRIM] –y a su líder María Teresa Botina– por la información suministrada sobre reciclaje de RAEE. Este documento se ha construido a partir de la ponencia del mismo nombre, presentada por los autores en el 10º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, organizado en de 2012 por la Universidad Icesi y la Universidad del Valle, bajo la temática: Dinámica de sistemas: Un enfoque de gestión y solución de problemas. El documento es inédito.

Resumen

El mundo evidencia un crecimiento de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos [RAEE], como consecuencia del continuo avance tecnológico, los precios, que los hacen cada vez más asequibles, y el comportamiento del consumidor. Este artículo presenta un modelo que simula la situación actual del sistema de gestión de residuos para el caso de televisores en Bogotá. Dicho modelo integra variables que describen la problemática y agentes que influyen dentro de la cadena de generación RAEE de televisores. El objetivo del estudio es determinar el comportamiento del sistema teniendo en cuenta diferentes políticas y acciones de los actores involucrados, las cuales se analizan bajo diferentes escenarios.

Abstract

The world is experimenting a growth of waste electrical and electronic equipment, WEEE, as a result of continuous technological progress, increasingly affordable prices and consumer behavior. This article presents a model that simulates the current situation of Bogotá's waste management system in the case of TV sets. This model includes variables that describe their influences and issues, and actors involved in the WEEE chain from televisions. The aim of this study is to determine the behavior of the system taking into account policies and activities of the actors involved, which are analyzed under different scenarios.

I. Introducción

Los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos [RAEE], tienen un crecimiento mayor al de los residuos sólidos urbanos, en gran parte debido a su elevado y creciente consumo. Este crecimiento se debe a varios factores, tales como: la introducción de nuevas adquisitivo o el acceso al crédito, entre otros. En Colombia la introducción de nuevas tecnologías ha generado un aumento en ventas. Por ejemplo, la venta de televisores aumentó 40% en 2004. Aun cuando al año siguiente descendió, el comportamiento refleja un crecimiento sostenido. Lo anterior conlleva a que los consumidores quieran reemplazar sus Aparatos Eléctricos y Electrónicos [AEE] con uno nuevo o desplazar el existente a otro lugar de la casa.

Existen varias clasificaciones de los RAEE. En el 2002 la directiva de la Unión Europea los dividió en diez categorías (UE, 2003). Otra clasificación contiene un código por colores: línea blanca, línea marrón y línea gris. Las tres líneas resultaron de los colores corrientes de los aparatos que pertenecían a la línea correspondiente, por ejemplo en la línea blanca están las neveras y lavadoras; en la línea marrón, los equipos de consumo de audio y video, como televisores, equipos de sonido y video; y en la línea gris o línea de tecnologías de comunicaciones, están los equipos de oficina, como computadores, celulares, impresoras, entre otros. No obstante, de acuerdo con el diseño de los productos que se ha desarrollado, algunas veces los aparatos no se pueden clasificar por su color. Latinoamérica propone cinco categorías, de acuerdo con el reciclaje, de la siguiente manera: aparatos que contienen refrigerantes, electrodomésticos grandes y medianos, equipos de iluminación, equipos con monitores y pantallas, y otros AEE (Relac, 2011). Sus diferentes clasificaciones dejan ver la complejidad y variedad de AEE existentes y la dificultad que trae su disposición final.

La disposición de los RAEE se ve enfrentada a dos retos mayores: por un lado, lograr el mayor aprovechamiento de los materiales que se pueden recuperar de ellos; por otro lado, el manejo correcto de sustancias peligrosas, para garantizar el menor impacto a la salud y al ecosistema. Sin embargo, los materiales que son más apreciados, por su alto valor en el mercado, son los metales preciosos, como el oro, el platino y el paladio, y los materiales especiales, como el indio, el selenio, el telurio, el tantalio, el bismuto y el antimonio (Chancerel, Meskers, Hageluken, & Rotter, 2009). Es por esto que surgen canales de reciclaje formal e informal. Los primeros, promovidos por el gobierno con el objeto de alcanzar dichos retos, tienen una estructura organizacional y económica definida; y de otro lado, el reciclaje informal, que busca ofrecer medios de sustento informal a los recicladores y que, por lo mismo, no está económicamente reglamentado. En Colombia, específicamente en Bogotá, se dan iniciativas voluntarias para disposición de los RAEE apoyadas por el gobierno, pero también reciclaje informal de RAEE,

más aun cuando es a través de la población recicladora como se recupera el 8% de los materiales que se reciclan de los residuos sólidos urbanos, mientras que la iniciativa gubernamental a través de rutas selectivas de reciclaje solo recupera el 0,5% (Gómez, 2012).

De acuerdo con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], Colombia se encuentra en el Grupo C, porque su sistema formal de reciclaje se está desarrollando y porque además la recolección, el desmantelamiento y el aprovechamiento de materiales no ocurre a gran escala. Los otros grupos son: Grupo A, países con un sistema de reciclaje formal; y Grupo B, países que reciben RAEE de forma ilegal (UNEP, 2007)

Colombia tiene avances específicos en el tema de RAEE. A nivel de legislación esta la Resolución 1512 de agosto de 2010 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Computadores y/o Periféricos y se adoptan otras disposiciones. Además, la Red de Seguimiento, Evaluación y Sistematización en América Latina y el Caribe [RELAC] realizó en 2011 una propuesta de lineamientos para la gestión de los RAEE en Latinoamérica, que incluye recomendaciones generales, técnicas y normativas y sitúa a los RAEE en la categoría de residuos especiales más no peligrosos (Relac, 2011). Asimismo se han impulsado diferentes programas postconsumo, apoyados en el principio de extender la responsabilidad del productor. En el tema de RAEE, para computadores existe una iniciativa exitosa *Computadores para Educar*, la cual funciona desde el año 2000; su propósito es reducir la brecha digital y de conocimiento a través del acceso, el uso y el aprovechamiento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [TIC] en las comunidades educativas (CPE, 2012). Pero dicha iniciativa, al solamente extender la vida útil del artículo, no es responsable de retomar el equipo cuando cumple su vida útil, dejando RAEE en los lugares apartados donde el programa funcionó. Otras iniciativas o campañas son las relacionadas con celulares, que desde 2007 buscan la gestión ambientalmente segura de los residuos del subsector de telefonía móvil; la retoma de tóner y cartuchos usados; la retoma de neveras y la retoma en general de RAEE. Estos han sido programas muchas veces liderados por la industria y el gobierno (Ministerio de Ambiente, 2011). Un programa de recolección es *Ecolecta*, ubicado en almacenes de cadena, que al final de cada mes recibe los RAEE que quieran entregar los ciudadanos, los que son dispuestos por la empresa Lito S.A.

Como se evidencia, el Sistema de Gestión de RAEE tiene tantos actores involucrados y relaciones entre los mismos, que se empezó a modelar el sistema inicialmente para los televisores. Los televisores reúnen diferentes características que los hacen representativo para exponer el comportamiento del Sistema de Gestión RAEE: es el AEE con mayor penetración en los hogares colombianos; tiene materiales peligrosos y aprovechables; hubo cambio tecnológico, sustituyendo los televisores de tubos de rayos catódicos [CRT], por las pantallas planas (i.e., plasma, LCD y LED); el número

promedio de televisores por hogar en Colombia ha pasado de 2,5 en 2008 a 3 en 2012; se espera que se recolecte 0.2 kg/año por persona en 2011 y que se incremente a 0.35kg/año por persona en 2019 (Rodríguez, Estupiñán, & Boons, 2010). Otros estudios que se han hecho también determinan que el televisor tiene la mayor participación en los RAEE, que se generarán 40.000 toneladas en 2018 y constituyen RAEE con alto potencial contaminante junto con las neveras (Blaser, 2009).

II. Estado del arte de dinámica de sistemas en RAEE

Varias son las aplicaciones de dinámica de sistemas a los sistemas de gestión de residuos RAEE. La aplicación de estrategias ambientales específicamente en legislación ambiental, ciclo cerrado en la cadena de suministro y diseño para el ambiente, muestran aumento en la cantidad de recursos naturales, disminución en la cantidad de productos que se disponen y aumento en la ganancia total de la cadena de suministro (Georgiadis & Besiou, 2009). Otro evalúa el impacto que tiene la legislación sobre la conservación de los recursos naturales y rellenos sanitarios, concluyendo que se requieren medidas legislativas para garantizar niveles de reciclaje, la reciclabilidad de los productos y el contenido de materiales reciclables en los mismos (Georgiadis & Besiou, 2008). En otro documento se evalúa el impacto de los recicladores informales en el sistema formal, cuando se consideran tres medidas legislativas: ignorarlos, colocarles barreras o incluirlos dentro de los sistemas formales, siendo esta última opción la que muestra mayor sostenibilidad en los ámbitos económicos sociales y ambientales (Besiou, Georgiadis, & Van Wassenhore, 2010).

Con el propósito de recuperar la mayor cantidad de materiales del reciclaje de teléfonos celulares obsoletos, el sistema es estudiado para alcanzar mayor efectividad, concluyendo que la tasa de recolección se debe incrementar, así como la cantidad de material que se debe recuperar en el reciclaje, especialmente en países en vía de desarrollo (Bollinger, 2010). Así mismo la dinámica de sistemas es utilizada para conocer si es posible recuperar mas materiales del proceso de reciclaje, a través de proceso de ciclo cerrado (Glöser, 2012).

En otro documento se evalúa como reducir el tiempo de almacenamiento en los centros de tratamiento y como incrementar el material reciclado, mediante mejores prácticas y la introducción de otro canal de recolección: los supermercados (Gallo, Romano & Santillo, 2011).

Las aplicaciones en otras áreas son múltiples, como por ejemplo modelos en: tráfico de una ciudad, abastecimiento de agua, prevención de enfermedades coronarias y gestión de residuos sólidos urbanos, estos últimos analizados con mayor detalle. Adicionalmente el enfoque de los modelos varía, ya que los parámetros y las consideraciones específicas bajo las cuales se desarrollan son propios de cada uno.

Para el diseño y el planteamiento de modelos, existen diferentes marcas de software de amplio uso en las aplicaciones prácticas de dinámica de sistemas; entre las más

usadas se encuentran: Ithink, que tiene funcionalidades específicas para aplicaciones en economía y gestión de empresas (dada su disponibilidad académica se optó por su uso para la obtención del modelo final y consecución de los objetivos planteados en la investigación); y Vensim, el software más completo y versátil que existe en la creación de modelos de Dinámica de Sistemas, que permite cubrir todas las áreas propias de la modelización, desde los modelos más sencillos hasta los más complejos. Otros software usados son *Professional Dynamo*, *Powersim studio* y *Stella & I-Think*.

III. Modelo

A. Método

Dada la complejidad de la situación a modelar, debido no solo a la multiplicidad de factores, sino también a las interrelaciones entre ellos, la dinámica de sistemas se convierte en la herramienta más adecuada para estudiarla por varias razones: primero, este método permite adicionar muchas variables y relaciones (lineales, no lineales y con retardos) entre ellas, para poder entender un fenómeno particular, no está limitado a un número fijo de variables ni de relaciones y, por tanto, puede representar situaciones complejas; segundo, permite realizar análisis de políticas a través de diversos escenarios, en los que permite entender el comportamiento del sistema ante una alteración – establecida a través de una o varias políticas– a alguna de sus variables.

En el caso particular de este documento, se trata de ejemplificar los flujos y stocks de los televisores, por tecnología, que terminan siendo RAEE y materia prima de otras industrias. Estos residuos contribuyen a la acumulación de contaminantes peligrosos, los cuales, sin un debido tratamiento, pueden generar un impacto negativo al medio ambiente y a la salud. Sin embargo, las políticas que rigen estos flujos son variadas y es precisamente una visión holística la que puede proporcionar una perspectiva amplia y completa del comportamiento de estas sustancias.

B. Descripción del modelo

El objetivo del modelo es lograr entender el comportamiento de gestión de los RAEE a la luz de diversas políticas. El modelo recoge una gran diversidad de variables relacionadas entre ellas, lo que permiten describir, reproducir y analizar el manejo de los RAEE en la ciudad de Bogotá.

El modelo propuesto está enfocado en la disposición final de los AEE, con el fin de proponer un sistema de gestión que logre la mayor recuperación de materiales en canales formales, para evitar los impactos negativos de su mala disposición. El modelo consta de variables que describen el flujo físico del proceso de transformación del televisor, desde cuando está nuevo hasta cuando se convierte en un RAEE. Así mismo se determinaron variables que plasman la cultura de la población bogotana, con el fin de entender la importancia y la dinámica que tiene el televisor dentro de los hogares y lo que sucede cuando este cumple su ciclo de vida.

En la Figura 1, el diagrama causal permite visualizar las diferentes variables y sus

relaciones. La tabla 1 presenta el listado de variables y su descripción.

El flujo físico del modelo empieza desde la producción e importación de televisores,

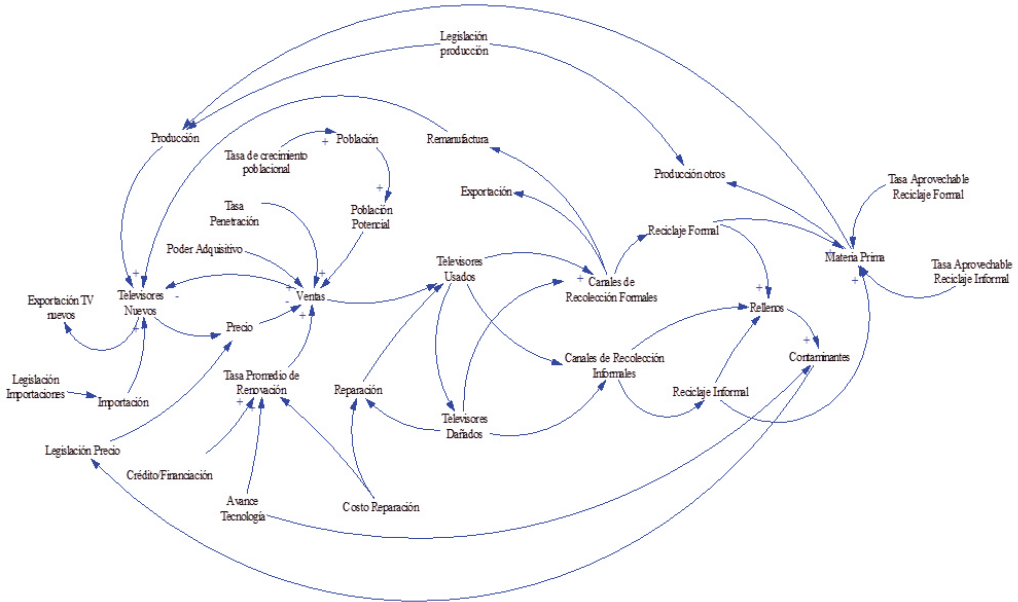


Figura 1. Diagrama causal: cadena de los televisores

Tabla 1. Conceptualización de variables

| # | Nombre | VARIABLES (#.) | Definición Conceptual | Tipo | Unidad de medida |
|---|-----------------------------|----------------|--|------|------------------|
| 1 | Obsolescencia Programada | 3 | No. de años por tiempo en uso de un tv según la tecnología. | K | Años |
| 2 | Crédito / Financiación | 1 | No. de personas que adquieren un crédito para compra de tv | C | Personas |
| 3 | Avance Tecnología | 1 | Cambios tecnológicos significativos en tv | D | Tiempo |
| 4 | Costo Reparación | 3 | Costo ponderado de reparar un tv dañado. | K | \$(miles) |
| 5 | Tasa Promedio de Renovación | 3 | Frecuencia de recambio de TV | C | % |
| 6 | Precio | 3 | Precio promedio ponderado de un TV según la tecnología. | K | \$(miles) |
| 7 | Poder Adquisitivo | 1 | Promedio ponderado del poder adquisitivo de la población de Bogotá | C | \$(miles) |

Tabla 1. Conceptualización de variables (cont.)

| # | Nombre | Variables (#.) | Definición Conceptual | Tipo | Unidad de medida |
|----|-----------------------------------|----------------|---|------|------------------|
| 8 | Tasa Penetración | 1 | Porcentaje de hogares bogotanos en los que hay por lo menos un tv | C | % |
| 9 | Tasa de crecimiento de población | 1 | Tasa de crecimiento de la población | C | % |
| 10 | Población | 1 | No. total de hogares de la ciudad de Bogotá | C | Hogares |
| 11 | Población potencial | 1 | No. total de hogares potenciales de la ciudad de Bogotá. | C | Hogares |
| 12 | Venta | 3 | No. total de tv por tecnología usados | C | Unidad |
| 13 | Tv Usados | 3 | No. total de tv por tecnología usados | C | Unidad |
| 14 | Tv Dañados | 3 | No total de tv por tecnología dañados. | C | Unidad |
| 15 | Reparación | 3 | No. total de tv por tipo de tecnología reparados. | C | Unidad |
| 16 | Legislación | 1 | Efectos de la legislación sobre el modelo. | K/C | - |
| 17 | Canales formales de recolección | 1 | Cantidad en pesos de tv por tecnología usados y dañados que entraron al canal de recolección. | C | Ton |
| 18 | Exportación | 1 | Cantidad en peso de RAEE exportadas. | C | Ton |
| 19 | Remanufactura | 1 | Cantidad en peso de RAEE re manufacturados. | C | Ton |
| 20 | Reciclaje Formal | 1 | Cantidad en peso de RAEE por tecnología recogida por entidades de reciclaje formal (Lito S.A.). | C | Ton |
| 21 | Canales informales de Recolección | 1 | Cantidad en peso de tv usado y dañado por tecnología que entraron al canal de recolección. | C | Ton |
| 22 | Reciclaje Informal | 1 | Peso de RAEEs recogidas por recicladores informales. | C | Ton |
| 23 | Relleno sanitario | 1 | Cantidad (peso) de RAEE por tipo de tecnología. | C | Ton |
| 24 | Materia Prima | 3 | Cantidad (peso) de la materia prima tipo n extraída s/n tipo de tecnología. | C | Ton |

Tabla 1. Conceptualización de variables (cont.)

| # | Nombre | Variables (#.) | Definición Conceptual | Tipo | Unidad de medida |
|----|----------------------------|----------------|---|------|------------------|
| 25 | Tasa Aprovechable Formal | 1 | % de RAEE aprovechado por entidades de reciclaje formal | K | % |
| 26 | Tasa Aprovechable Informal | 1 | % de RAEE aprovechado por recicladores informales | K | % |
| 27 | Producción otros | 1 | Peso de la materia prima usada para la producción de otros. | C | Ton |
| 28 | Producción | 3 | Peso de la materia prima usada para la producción de TV | C | Ton |
| 29 | Tv Nuevos | 3 | No. total de tv por tecnología nuevos disponibles para ventas | C | Unidad |
| 30 | Importación | 3 | No. total de tv por tecnología importados. | C | Unidad |
| 31 | Contaminantes | 3 | Cantidad en peso de contaminante tipo j por tecnología. | C | Ton |

1. El valor 3 determina la variable para cada tecnología (TRC, Plasma, LCD/LED), y el valor 1 determina una variable igual para todas las tecnologías.

2. Constante (K); Continua (C); Discreta (D)

3. \$ (miles) se refiere a miles de pesos colombianos

que se introducen en el mercado para ser comprados por un hogar que desea adquirir o cambiar su televisor, ya sea porque cumplió su ciclo de vida o por el deseo de actualización de tecnología. Cabe destacar que el ciclo de vida es el tiempo esperado de funcionamiento óptimo del televisor, este tiempo también es conocido como la obsolescencia programada, que es determinada por el fabricante. Un fenómeno particular en la sociedad es que la obsolescencia percibida, i.e., el tiempo que un hogar considera necesario para hacer un recambio de su televisor sin importar que aún funcione, prima sobre la obsolescencia programada. El televisor reemplazado se desplaza a otro hogar o es almacenado por largos periodos de tiempo, ocasionando un retardo, ya que permanece dentro de la cadena como televisores usados, hasta que se convierte en RAEE, momento en que se hace entrega a uno de los canales de recolección, sea formal o informal.

Una de las variables más críticas es la tasa promedio de renovación o frecuencia de recambio, la cual está determinada por: el avance tecnológico; el precio de compra; la facilidad de crédito y financiación para adquirir bienes; la obsolescencia programada; y el costo de reparación de la tecnología antigua (pues si supera el 30% del precio de uno nuevo, se prefiere no renovar).

El modelo discrimina por tipo de tecnología con el fin identificar sus componentes –cuáles son aprovechables y cuáles son contaminantes–. Se contemplan dos canales de

recolección, el formal y el informal. El canal de recolección informal maneja el 90% de los RAEE emitidos en Bogotá, el cual solo aprovecha el 10% de los materiales, que son llevados a través de una cadena de varios actores para lograr el aprovechamiento final. El resto de residuos es depositado en el relleno, pues se abandona la pantalla y el cono que contienen plomo para que sea recolectado por las empresas que manejan los residuos ordinarios.

La recolección formal es realizada por empresas certificadas y la recolección informal la realizan recicladores, mejor llamados recuperadores, u organizaciones no autorizadas para la manipulación de estos residuos. Dichos canales difieren en la tecnología usada y el nivel de aprovechamiento de los residuos, ya que los canales informales hacen el desensamble y la recuperación de manera manual, así mismo los componentes peligrosos que no son recibidos por las bodegas de recuperación o intermediarios son dispuestos en la calle para que las empresas de aseo lo lleven al botadero. El manejo y disposición inadecuada genera el impacto negativo en la salud humana y en el ambiente. En ambos canales el objetivo es la recuperación de materia prima especialmente metales (e.g., cobre, aluminio y metales ferrosos), que terminan en canales formales para ser materia prima de industrias nacionales o de exportación. Es así como un porcentaje de los RAEE entra de nuevo a la cadena como materia prima para procesos industriales o para hacer parte de un nuevo televisor fabricado o de otro AEE.

A partir del modelo se identifican las variables que directa o indirectamente afectan el flujo para luego visualizar los focos a atacar, para garantizar el mayor aprovechamiento y reducir los impactos negativos del inadecuado manejo de los contaminantes, y así determinar políticas para un adecuado sistema de gestión integral. Las políticas que se tuvieron en cuenta son: *Responsabilidad Extendida al Productor* [REP]; *Quien Contamina Paga* [QCP]; *Reducir, Reutilizar, Reciclar* [3R], introducción de legislación, entre otras.

IV. Análisis

Basados en el modelo que se expuso, se estableció una serie de políticas para ver su efecto en el sistema de recolección y disposición de RAEE y el nivel de contaminantes que esto conlleva. Se busca la adopción del principio de responsabilidad extendida del productor/importador y se proponen dos tipos de políticas: restrictivas y estimulantes. Las políticas restrictivas son aquellas que por su naturaleza, impiden o castigan que algún eslabón o agente en el sistema haga algo; por ejemplo, impuestos gubernamentales por la mala disposición de los televisores o por el manejo de los contaminantes una vez los televisores se convierten en RAEE. Las políticas que generan estímulos, por su parte, son aquellas que propenden para que se efectúe una serie de actividades; por ejemplo, hay políticas para estimular la disposición de televisores o incentivar su reciclaje formal. Ambos conjuntos de políticas tienen un efecto diferente en el modelo y el cual da luces sobre el tipo de lineamientos que se deben establecer para disminuir el impacto de los contaminantes.

La legislación es el mecanismo por el cual se determinan y establecen las políticas

públicas. Las políticas restrictivas incluyen: tributación, multas específicas por la ejecución de actividades particulares, entre otras, mientras que las políticas que generan incentivos son aquellas que motivan variables claves, por ejemplo, la tasa promedio de renovación para aumentar ventas, que la recolección de televisores sea hecha por las empresas y se canalice a recicladores formales, donde se recupera una mayor parte de los materiales y se logra un mejor manejo de los elementos contaminantes.

A través de la manipulación de los valores de las variables críticas, y bajo el marco regulatorio que se adopte (restrictivo o de estímulos), se generó una serie de resultados que replican el comportamiento del sistema en el largo plazo. La idea es entonces encontrar la mejor combinación de políticas (*high leverage points*) que generen puntos de desarrollo y guíen al sistema hacia instancias mayores de progreso y baja contaminación.

Para empezar, los resultados de las simulaciones realizadas muestran que, debido a la baja participación de la producción nacional en la oferta en el mercado de televisores en Colombia y Bogotá, sin importar el tipo de tecnología que se seleccione, el bucle de retroalimentación que llega de la materia prima que se recupera a través del reciclaje es muy débil. Este bucle de retroalimentación, que teóricamente es positivo, no está teniendo el efecto pensado.

Adicionalmente, el reciclaje preponderante es el informal, lo que significa que la cantidad de material que puede ser aprovechado luego de este proceso es menor que aquel más tecnificado que se encuentra en el reciclaje formal. Esto significa que la cantidad de materia prima que se puede recuperar es muy baja, lo que debilita aún más el bucle de retroalimentación que llega a la producción nacional para afectar el precio de televisores y así a toda la cadena. Para reforzar este bucle se necesita de una legislación que fortalezca la producción nacional (proteccionismo) y estimule la consecución de materia prima reciclada a través de mayores tecnologías. Sin embargo, debe ser tan estricta esta legislación, que las cantidades de la producción nacional deben ser comparables con las importaciones, para tener incidencia en el precio y por tanto en las ventas de televisores.

Por otro lado, la industria nacional de producción de televisores no está madura, por lo que no podrá competir en igualdad de condiciones a industrias más desarrolladas, como Japón o Corea. En vista de este escenario, resultaría mejor adoptar otra serie de medidas para poder controlar la tasa de contaminantes que generan estos aparatos electrónicos.

Otro hallazgo importante radica en la dinámica de los televisores. Los televisores usados sólo se convierten en materiales peligrosos o materia prima en la medida en que se recolecten, bien sea a través de los canales formales o informales. Por tanto, el retardo que sufren los televisores para llegar al proceso de reciclado y convertirse en materia prima, lo causan los hogares; cualquier política que expanda este retardo va, en primera instancia, a beneficiar el cúmulo de materiales contaminantes. Sin embargo, esta es una solución de doble filo, dado que eventualmente esta bomba de tiempo explotará,

es decir, la acumulación que hacen los hogares de televisores usados tendrán que ser desechos en algún momento, incrementando las cifras de contaminantes.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de los televisores usados en el tiempo. Vale la pena resaltar que los televisores TRC experimentan un declive luego que pasan los años de la obsolescencia programada o a través del cambio tecnológico, es decir, los hogares desechan los televisores cuando se cumple su ciclo funcional. Por otro lado, los cambios tecnológicos que han derivado en tecnologías de televisores plasma y LCD/LED, experimentan un aumento a partir de los años 5 y 6. Su declive empieza más adelante, mientras pasa el tiempo de obsolescencia programada para ellos.

Al poner una legislación que afecte directamente el precio de los televisores,

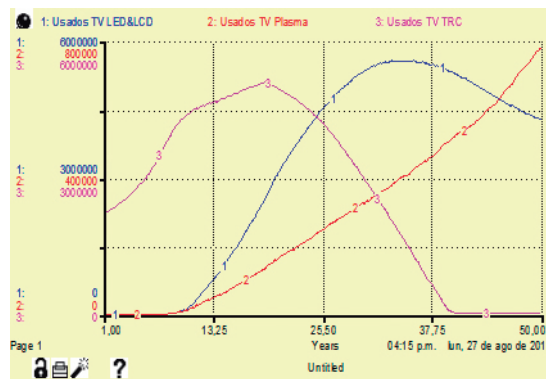


Figura 2. Comportamiento de los televisores usados en el tiempo (I)

independiente de la tecnología empleada, como puede ser un gravamen, su demanda disminuye abruptamente. Es decir, una intervención estatal, que se active de acuerdo con la tasa de material electrónico (televisores) que están recibiendo los rellenos, y que al final se convertirán en elementos contaminantes, puede generar una caída en la demanda de manera sustancial, que afecte toda la cadena (ver Figura 3.). Por otra parte, trasladar el costo del manejo de las sustancias contaminantes al productor es, en cierta forma, afectar el precio del televisor, por lo que afectaría su demanda.

No obstante, la implementación de una política de esta índole puede ser difícil y laboriosa en términos prácticos, dado que el impuesto que se debe pagar esta acorde a unas mediciones de material que llega a los rellenos, la cual no solo es en sí difícil, sino que también está siendo afectada por múltiples factores.

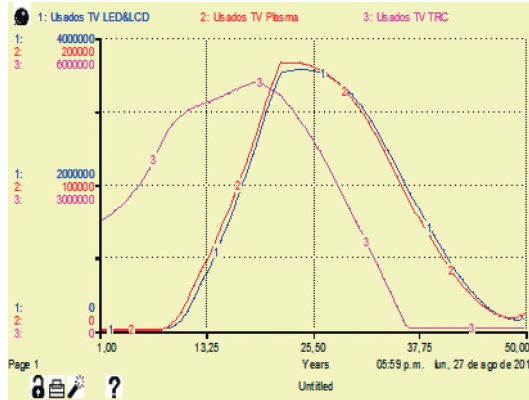


Figura 3. Comportamiento de los televisores usados en el tiempo (II)

Conclusiones

Gran parte de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos no son reciclables en Colombia, debido a la informalidad e inmadurez de esta industria en el país. Por tanto, las políticas de largo plazo que surtirían efecto sobre la cadena serían aquellas que modifiquen, formalicen y desarrollen esta industria, lo cual lograría un mejor aprovechamiento de los materiales reciclados, bien sea en la industria de televisores nacionales (que es más bien poca) o en cualquiera de las otras industrias.

Asimismo, la actual tendencia a recortar el ciclo del producto, dados los avances tecnológicos, genera una mayor presión en la cadena y, por ende, en los materiales contaminantes. Sin embargo, el efecto no es inmediato, ya que los hogares permanecerán por un tiempo, aunque cada vez más corto, con estos aparatos en sus casas. No obstante, la presión de mantener varios equipos electrónicos en las casas aumenta la presión de tener que recolectarlos, por lo que se repite, que las políticas encaminadas en desarrollar el reciclaje formal en el país puede ser la vía para reducir los peligros derivados de las sustancias peligrosas mal manejadas.

Por último, se considera que las mejores políticas serían aquellas preventivas, que inicien desde el diseño del producto. De esta manera, los materiales utilizados en su fabricación ya contemplan su posterior proceso de reciclado, reduciendo con ello los costos del manejo de residuos contaminantes y disminuyendo la cantidad de agentes que intervienen en la cadena. ⁵⁶

Referencias bibliográficas

- Besiou M, Georgiadis P, & Van-Wassenhore L. (2010). Official recycling and scavengers. symbiotic or conflicting? *European Journal of Operational Research*, 218(2), 563–576
- Blaser, F. 2009. *Gestión de residuos electrónicos en Colombia. diagnóstico de electrodomésticos y de aparatos electrónicos de consumo*. Bogotá D.C., Colombia: EMPA, ANDI, CNPML

- Bollinger, A-L. (2010). *Growing cradle-to-cradle metal flow systems. An application of agent-based modeling and system dynamics to the study of global flows of metals in mobile phones* [Tesis de maestría]. Leiden University: Holanda
- Chancerel, P., Meskers, C.E.M., Hageluken, C., & Rotter, V.S. (2009). Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 13(5), 791-810
- Computadores para educar [CPE] (2012, Abr. 10). *¿Qué es CPE?* [en línea] Disponible en http://www.computadoresparaeducar.gov.co/website/es/index.php?option=com_content&task=view&id=44&Itemid=139
- European Parliament & Council of the European Union [UE] (2003, Feb. 13). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*, L 37/24. Disponible en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0024:0038:en:PDF>
- Gallo, M. Romano E, & Santillo L. (2011). A methodological approach to manage WEEE recovery systems in push/pull logic. En *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, (pp. 1035-1047). Piscataway, NJ: IEEE.
- Georgiadis, P. & Besiou, M. (2008). The importance of feedback loops designing environmental policies for sustainable development. En *Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society*, July 20 – 24, 2008. Athens, Greece [en línea]. Recuperado de <http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/GEORG312.pdf>
- Georgiadis, P. & Besiou, M. (2009). Environmental Strategies for Electrical and Electronic Equipment Supply Chains: Which to Choose?. *Sustainability*, 1, 722-733
- Glöser, S. (2012). *Quantitative analysis of the criticality of mineral and metallic raw materials* [Poster en International Conference of the System Dynamics Society 13th PhD Colloquium of the Student Chapter July 22nd 2012 St. Gallen Switzerland]. Recuperado de http://student.systemdynamics.org/wp/wp-content/ulf/colloquia/2012-proceedings/2012_gloeser_poster.pdf
- Gómez, L. (2012, abr. 12). UAESP. *Bogotá solo recicla el 0,5 por ciento del material potencialmente reutilizable* [en línea]. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-7582527>
- Ministerio de Ambiente (2011, nov. 3). *Gestión de Residuos Posconsumo* [en línea]. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co//contenido/contenido.aspx?conID=7769&catID=1342>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010, agosto 10). Resolución 1512 de 2010. *Diario Oficial No. 47797*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Red de Seguimiento, Evaluación y Sistematización en América Latina y el Caribe [RELAC]. (2011). *Lineamientos para la gestión de los RAEE en*

Latinoamérica. [en línea]. Recuperado de <http://www.residuoselectronicos.net/documents/110410-documento-lineamientos-para-la-gestion-de-raee-en-la-mesa-de-trabajo-publico-privada.pdf>

Rodríguez, L.A., Estupiñán, E., Boons, F. (2010). Dealing with electrical and electronic equipment waste in Colombia. The case of TV sets. 3Rs and environmentally sound Management of

wastes for achieving sustainable cities of the journal regional development dialogue. *RDD*, 31(2), 103-121

Unites Nations Environment Programme [UNEP] (2007). *e-waste. Volume inventory assessment manual*. Nairobi, Kenya: UNEP. Disponible en http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/spc/EWasteManual_Vol1.pdf

Curriculum vitae

Luz Angélica Rodríguez Bello

Ingeniera Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Ph.D. (candidate) Industrial Ecology and Sustainability, Erasmus University of Rotterdam (Holanda). Máster en Gestión y Políticas Ambientales del International Institute for Industrial Environmental Economics [IIIEE], Lund University (Suecia). Especialista en Informática Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Especialista en Aseguramiento de la Calidad del Convenio ICONTEC y Universidad Agraria de Colombia. Directora del Centro de Estudios en Sistemas de Gestión y Profesor Asociado de pregrado y posgrado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá).

Nicolás González Espinosa

Ingeniero Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Especialista en Economía para Ingenieros de la misma universidad y Magister en Administración Pública de Columbia University (NY). Decano del Programa de Ingeniería Industrial y Director de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ha sido Director del Centro de Estudios de Optimización y profesor de planta de la misma universidad. Ha sido profesor en la Universidad EAFIT, la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad Sergio Arboleda.

Lorena Silvana Reyes Rubiano

Ingeniera Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Asistente de investigación del Centro de Sistemas de Gestión de la misma universidad. Ingeniero de apoyo en reingeniería de procesos en empresa del sector de manufactura.

Andrés Felipe Torres Ramos

Ingeniero industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Asistente de investigación del Centro de Sistemas de Gestión de la misma universidad. Ingeniero de apoyo en procesos de reingeniería de la empresa del sector de manufactura.