

54

Fecha de presentación: febrero, 2019

Fecha de aceptación: mayo, 2019

Fecha de publicación: julio, 2019

GESTIÓN

DE LA CADENA DE SUMINISTRO INVERSA EN ELECTRODOMÉSTICOS EN FIN DE USO: RETOS Y OPORTUNIDADES

MANAGEMENT OF THE REVERSE SUPPLY CHAIN IN HOUSEHOLD APPLIANCES: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Omar Cevallos Muñoz¹

E-mail: ocevallos@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6926-4384>

Patricio Alcócer Quinteros¹

E-mail: palcocer@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-5529>

René Abreu Ledón²

E-mail: rabreu@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-1022>

¹ Universidad Estatal de Quevedo. Ecuador.

² Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

Cita sugerida (APA, sexta edición)

Cevallos Muñoz, O., Alcócer Quinteros, P., & Abreu Ledón, R. (2019). Gestión de la cadena de suministro inversa en electrodomésticos en fin de uso: retos y oportunidades. *Universidad y Sociedad*, 11(4), 450-457. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

RESUMEN

La generación de desechos a partir de la actividad humana, de manera individual o industrial, es un problema que se mantiene como una de las principales preocupaciones en todos los órdenes, y la actividad comercial no escapa a esta situación, siendo la logística inversa un campo de estudio cada vez más analizado, con propuestas que intentan minimizar el impacto a partir de nuevos procesos desde las mismas cadenas de suministro. Pero, incluso soluciones que se proyectan desde la logística o proponen alternativas de reúso para materiales y recursos cuya vida útil llega a su fin, implican riesgos en el procesamiento, en el manejo, así como en gastos que las empresas no están dispuestas a asumir. De manera general, este artículo propone justamente una revisión de las cadenas de suministro inversa, para analizar las posibilidades de su implementación, así como los retos y dificultades asociados a su ejecución. Para ello, se tomará como referencia la gestión de los equipos electrodomésticos, con un enfoque metodológico que permita poner en perspectiva los elementos socioeconómicos que intervienen en su puesta en práctica y sostenibilidad.

Palabras clave: Logística inversa, cadena de suministro, cadena de suministro inversa, valor residual de productos.

ABSTRACT

The generation of waste from human activity, individually or industrially, is a problem that remains one of the main concerns in all orders, and the commercial activity does not escape this situation, being the reverse logistics a field of study more and more analyzed, with proposals that try to minimize the impact from new processes from the same supply chains. But, even solutions that are projected from the logistics or propose alternatives of reuse for materials and resources whose useful life comes to an end, imply risks in the processing, in the management, as well as in expenses that the companies are not willing to assume. In general, this article proposes a revision of the reverse supply chains, in order to analyze the possibilities of its implementation, as well as the challenges and difficulties associated with its execution. To this end, it will be taken as reference the management of household appliances, with a methodological approach that allows to put into perspective the socioeconomic elements involved in its implementation and sustainability.

Keywords: Reverse logistics, supply chain, reverse supply chain, residual value of products.

INTRODUCCIÓN

Tanto la producción, como el reciclaje o aprovechamiento de los recursos cuyo ciclo de vida útil concluyó, tienen un impacto directo en las economías nacionales, regionales y locales, y se asocian con beneficios sociales y conservación del medio ambiente. Justamente, como fruto de esas nuevas miradas, y para dar respuesta a las interrogantes, comienza el desarrollo de las definiciones de la logística inversa, que presenta los flujos que suceden de manera contraria a la logística tradicional.

Diversos autores relacionan estas concepciones con las dimensiones de la sostenibilidad y presentan la relación de estos procesos, aunque la mayor parte quedan en estrategias operacionales, más que en propuestas metodológicas basadas en un estudio contextual adecuado, que contempla la complejidad del objeto de estudio.

De manera general, la mayoría de autores se enfocan en la logística como un proceso que incluye fases como la planificación, movilidad y almacenaje de productos, e incluyen además sistemas de flujos, inventarios y manejo de residuales de esa actividad. Una revisión de Feitó Cespón (2011), al valorar varios conceptos (La Londe, 1994; Lambet, 1996; y Christopher, 2000, entre otros) concluye que *“logística es el proceso de gestionar los flujos material e informativo de materias primas, inventario en proceso, productos acabados, servicios y residuales desde el proveedor hasta el cliente, transitando por las etapas de gestión de aprovisionamientos, producción, distribución física y de los residuales”*.

Algunos autores (Mar & García, 2015), consideran a la logística inversa como una actividad con enorme potencial y se asocia muy fuertemente a sus posibilidades de reducción de costos para las empresas, así como fuente de oportunidades, acceso y gestión que permite a las organizaciones trabajar con un enfoque de responsabilidad social con mayor impacto.

Hevia (2008); y Mar & García (2015), añaden a esta conceptualización, una mirada desde la cadena de suministro, reforzando las perspectivas integradoras y de contribución al cuidado ambiental; asociado a estas visiones, es importante destacar el manejo de dos definiciones: cadena de suministro inversa y valor residual de los productos.

A las conceptualizaciones ya establecidas, estos últimos análisis incorporan nuevas funciones objetivos, evaluando aspectos como los costos de transportación, la ubicación

de los centros de recolección y plantas de procesamiento con diferentes funciones de desensamble, producción o recuperación de partes y ensamble.

Los métodos o modelos para encontrar soluciones a estas cuestiones también se enfocan desde diferentes aristas. En la actualidad, las propuestas se enfocan en modelos de programación lineal de enteros mixtos, soluciones heurísticas, aplicación de métodos de transportes para la recogida o distribución de materiales, consideración de aspectos propios de la teoría de colas para optimizar el tiempo de espera y de servicio hasta la utilización de algoritmos genéticos como solución más apropiada acorde con la cantidad de variables y combinaciones posibles que se consideran en el problema a analizar.

DESARROLLO

La presente propuesta de revisión en torno a los retos y posibilidades de la gestión de las cadenas de suministro inversa de electrodomésticos en fin de uso constituye un enfoque metodológico que integra de modo armónico conceptos de algunas áreas del conocimiento, para poner en perspectiva los beneficios que ofrece, así como las estrategias más adecuadas para limitar las dificultades asociadas a su puesta en práctica. En ese sentido, cobra vital importancia el valor residual como categoría que favorece procesos de sostenibilidad económica, ambiental y social.

Con ese propósito, se tomarán en cuenta los condicionamientos económicos, ambientales y sociales, así como de producción, tecnológicos y de recursos humanos que influyen en esa gestión. Este es un enfoque poco desarrollado, pues si bien existen muchos análisis que proponen miradas al proceso logístico, desde los actores y los procesos, la visión multidimensional y socialmente responsable es menos frecuente, aunque imperativo. De esta manera, se pretende dar respuesta mediante aportes teórico-metodológicos, a las necesidades actuales de configuración de cadenas de suministro inversas y, a nivel empírico, la integración de indicadores y sistematización de procesos.

Asociado a esto, tenemos también como método de indagación la formulación de un modelo multiobjetivo que contemple las tres dimensiones: económica, ambiental y social, y de esa manera trascender el habitual obstáculo asociado de cómo se presentan los modos de medir la sostenibilidad, principalmente desde una visión limitada que muestra una o dos de las dimensiones.

A los fines de esta propuesta de búsqueda, se prefiere un posicionamiento teórico que asume la logística inversa como un proceso que involucra la planificación, implementación y control, no solo de los procesos, sino de los flujos de los productos, la información, y los “desechos”, con el propósito de agregar valor a toda la gestión. Desde este punto de partida, el enfoque se centra en los procesos específicos como es el caso de los productos recuperados, en torno a los cuales se ubican acciones como:

a) El reúso, reventa o redistribución donde el producto es de nuevo utilizado sin realizarle procesos o tratamientos adicionales; generalmente sucede en productos que fueron devueltos por los clientes por daños leves.

b) El reprocesamiento, presentándose como: reparación del producto, restauración del producto o remanufactura de una de sus piezas; una vez realizadas estas operaciones pueden ser de nuevo utilizados en el mercado con las mismas funcionalidades o en nuevos productos.

c) El reciclaje de las piezas de los productos, materiales de empaque y contenedores reutilizables, permitiendo el ahorro de costos y protección al medioambiente.

d) Eliminación en la cual se destruye el producto y luego se envía a botaderos de basura, opción que cierra la posibilidad de usarlo en otros procesos productivos.

Dado este escenario, resulta imperativo la implementación de procesos de gestión adecuados, cuyo resultado

no sea solo de la acción independiente de empresas, organizaciones o grupos de personas que se dedican a una actividad en específico, sino de un marco normativo que incluya estas fases de la producción como parte de las estrategias del sector industrial y comercial.

En el país, a esta actividad se dedican tres grupos fundamentales:

- La red de talleres de servicios en productos de fin de uso de línea blanca (reacondicionamiento, reúso, canibalización, reciclaje y disposición) se estima que a nivel de país existe alrededor de 1 421 talleres.
- Los recicladores de chatarra, donde algunos poseen equipos de mínima tecnología como compactadoras semimanuales, equipos de oxicorte y otras herramientas manuales con el objetivo de preparar (compactar o cortar) la chatarra liviana o retacear la chatarra gruesa.
- El tercer grupo lo constituyen los recolectores de materias primas “deambulantes” que recogen equipos que se desechan en las calles, y este grupo los traslada a uno de los grupos anteriores de manera íntegra o canibalizado.

Sobre este precedente, se ofrece un modelo matemático, como alternativa de medición de la sostenibilidad, en sus tres dimensiones: económica, ambiental y social. En la Figura 1 se trata de configurar un esquema que muestra la concepción de la cadena, sus participantes, los generadores de insumos, recolectores, centros de procesamiento y clientes.

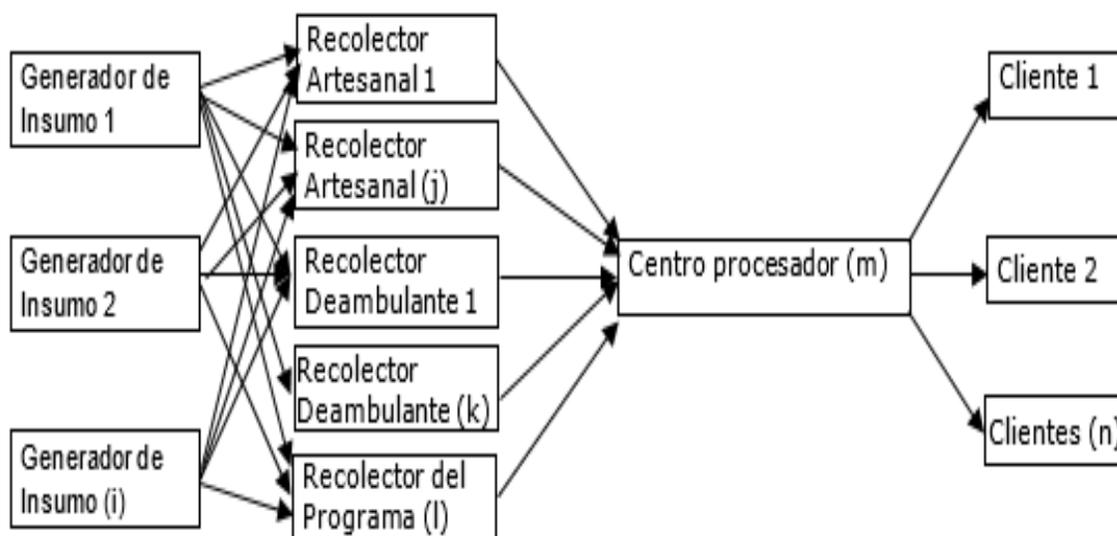


Figura 1. Diagrama general de la cadena de suministro inversa.

Este modelo es una representación aproximada de la realidad, pero está en la capacidad de describir cómo funciona esta, así mismo se definen una serie de supuestos que permiten el análisis del modelo multiobjetivo, estos son:

- El modelo es para varios productos, aunque se esté hablando de recuperar solo los refrigeradores en fin de uso, también se puede recuperar sus componentes.
- Se conoce la localización las fuentes y los clientes.
- Se conoce la localización de los recolectores y del centro procesador.
- La capacidad de los recolectores se considera infinita pero pueden dimensionarse.
- La capacidad del centro de procesamiento es finita y conocida.
- La generación de refrigeradores en fin de uso y la demanda de estos así como de sus partes recuperadas tienen comportamiento estocástico.
- Los costos variables y fijos de la generación, transporte y del centro de procesamiento son determinísticos y conocidos.
- Solamente se permiten los flujos de materiales entre dos eslabones consecutivos de la cadena de suministro.

De acuerdo con Feitó Cespón (2016), en la organización del flujo de los p materiales diferentes, de la cantidad Q_p , la ubicación de las instalaciones, la cantidad de viajes y tipo de medios de transporte necesarios, y adaptando al proceso de la cadena de suministro inversa de refrigeradores, se definen los conjuntos, variables de decisión, parámetros, funciones objetivo y restricciones del modelo multiobjetivo que se utilizará para la cadena de suministro inversa.

Conjuntos

Están representados en los participantes de la red de la cadena de suministro, estos se identifican como:

i : conjunto de fuentes generadoras de refrigeradores en fin de uso ($i=1,2,, I$).

j : conjunto de recolectores artesanales de refrigeradores en fin de uso ($j=1,2,, J$).

k : conjunto de recolectores deambulantes de refrigeradores en fin de uso ($k=1,2,, K$).

l : conjunto de recolectores del programa ($l=1,2,, L$).

m : conjunto de centro de procesamiento ($m=1$).

n : conjunto de clientes ($n=1,2,, N$).

p : conjunto de producto a recuperar ($p=1,2,,P$)

Variables de decisión

CSR_{ijop} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre la fuente i y el recolector artesanal j .

CRP_{jmop} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre el recolector artesanal j y el centro procesador m .

CPC_{mnop} : cantidad de producto p a transportar el medio o , entre el centro procesador m y el cliente n .

CSR_{ikop} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre la fuente i y el recolector deambulante k .

CRP_{kmop} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre el recolector deambulante k y el centro procesador m .

CSR_{ilop} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre la fuente i y el recolector del programa l .

CRP_{lmp} : cantidad de producto p a transportar en el medio o , entre el recolector del programa l y el centro procesador m .

VSR_{ijo} : cantidad de viajes entre la fuente i y el recolector artesanal j utilizando el medio o .

VSR_{iko} : cantidad de viajes entre la fuente i y el recolector del programa l utilizando el medio o .

VRP_{jmo} : cantidad de viajes entre el recolector artesanal j y al centro procesador m utilizando el medio o .

VRP_{kmo} : cantidad de viajes entre el recolector deambulante k y al centro procesador m utilizando el medio o .

VRP_{lmo} : cantidad de viajes entre el recolector del programa l y al centro procesador m utilizando el medio o .

VPC_{mno} : cantidad de viajes entre el centro procesador m y el cliente n utilizando el medio o .

HSR_{ijop} , HSR_{ikop} , HSR_{ilop} , HRP_{jmop} , HRP_{kmop} , HRP_{lmp} son variables para representar las cantidades de viajes por exceso y defecto, necesarias para el balance de los medios de

transporte.

R_j (utilización del recolector artesanal j), (utilización del recolector ambulante k) y (utilización del recolector del programa l), constituyen variables binarias que se definen como sigue:

$$R_j = \begin{cases} 1, & \text{Si el recolector artesanal } j \text{ es utilizado} \\ 0, & \text{Si el recolector artesanal } j \text{ no es utilizado} \end{cases}$$

$$R_k = \begin{cases} 1, & \text{Si el recolector deambulante } k \text{ es utilizado} \\ 0, & \text{Si el recolector de ambulante } k \text{ no es utilizado} \end{cases}$$

$$R_l = \begin{cases} 1, & \text{Si el recolector del programa } l \text{ es utilizado} \\ 0, & \text{Si el recolector del programa } l \text{ no es utilizado} \end{cases}$$

Parámetros

G_{ip} : cantidad de producto p de la fuente i generado en el período.

CT_{op} : capacidad del medio o para transportar el producto p.

C_{mp} : capacidad del centro procesador m para procesar el producto p en el período.

D_{np} : demanda de cada cliente n del producto p en el período.

N_{vo} : Número de viajes disponibles en el período para cada medio de transporte o.

I_p : impacto ambiental por producir una unidad nueva del producto p.

IT_o : impacto ambiental por transportar una tonelada-kilómetro en el medio de transporte o.

IK : impacto ambiental por consumir un kilovatio hora en el sistema.

I : impacto ambiental producido por la infraestructura.

IA : impacto ambiental por consumir un kilogramo de agua en el sistema.

IV_p : impacto ambiental por desechar en un vertedero una unidad del producto p, luego de su consumo.

Cfe_m : consumo eléctrico fijo del centro procesador m.

Cfe_l : consumo eléctrico fijo del recolector del programa l.

Cve_p : consumo variable de electricidad necesaria para procesar una unidad del producto p.

Cva_p : consumo variable de agua necesaria para procesar una unidad del producto p.

α_m y β_l : proporción de la capacidad del centro procesador m y el recolector del programa l respectivamente.

$d^{ij^{SR}}$: distancias entre el suministrador i y cada recolector artesanal j.

$d^{ik^{SR}}$: distancias entre el suministrador i y cada recolector deambulante k.

$d^{il^{SR}}$: distancias entre el recolector artesanal j y el centro procesador m.

$d^{km^{RP}}$: distancias entre el recolector deambulante k y el centro procesador m.

$d^{lm^{RP}}$: distancias entre el recolector del programa l y el centro procesador m.

$d^{mn^{PC}}$: distancias entre el centro procesador m y cada cliente n.

CUR_{jp} : costo unitario del producto p en el recolector artesanal j, en \$/unidad.

CUR_{kp} : costo unitario del producto p en el recolector deambulante k, en \$/unidad.

CUR_{lp} : costo unitario del producto p en el recolector del programa l, en \$/unidad.

CUP_{mp} : costo unitario del producto p en el centro procesador m, en \$/unidad.

CUT_o : costo variable por tkm del medio de transporte o, en \$/tkm.

CFR_j : costo fijo por utilizar el recolector artesanal j, en \$/período.

CFR_k : costo fijo por utilizar el recolector deambulante k, en \$/período.

CFR_l : costo fijo por utilizar el recolector del programa l, en \$/período.

CFP_m : costo fijo por utilizar el centro procesador m, en \$/ período.

CFT_o : costo fijo por utilizar el transporte o, en un viaje en \$/viaje. (Ecuaciones 1.1-1.2).

$$\min f_1 \left(\begin{matrix} CSR_{ijop}, CRP_{jmop}, CPC_{mno}, CSR_{ikop}, CRP_{kmop}, CSR_{ilop}, CRP_{lmop}, VSR_{ijoi} \\ VSR_{iko}, VSR_{ilo}, VRP_{jmo}, VRP_{kmo}, VRP_{lmo}, VPC_{mno}, R_j, R_k, R_l \end{matrix} \right)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_o CFT_o \left(\sum_i \sum_j VSR_{ijoi} + \sum_i \sum_k VSR_{iko} + \sum_i \sum_l VSR_{ilo} + \sum_j \sum_m VRP_{jmo} \right. \\ &\quad \left. + \sum_j \sum_k VRP_{kmo} + \sum_j \sum_l VRP_{lmo} + \sum_m \sum_n VPC_{mno} \right) \\ &+ \sum_o CUT_o \left(\sum_i \sum_j \left(\sum_p CSR_{ijop} \right) VSR_{ijoi} d_{ij}^{SR} + \sum_i \sum_k \left(\sum_p CSR_{ikop} \right) VSR_{iko} d_{ik}^{SR} \right. \\ &+ \sum_i \sum_l \left(\sum_p CSR_{ilop} \right) VSR_{ilo} d_{il}^{SR} + \sum_j \sum_m \left(\sum_p CRP_{jmop} \right) VRP_{jmo} d_{jm}^{RP} \\ &+ \sum_k \sum_m \left(\sum_p CRP_{kmop} \right) VRP_{kmo} d_{km}^{RP} + \sum_l \sum_m \left(\sum_p CRP_{lmop} \right) VRP_{lmo} d_{lm}^{RP} + \\ &\quad \left. \sum_m \sum_n \left(\sum_p QPC_{mno} \right) VPC_{mno} d_{mn}^{PC} \right) + \sum_k CFP_m + \sum_m \sum_p CUP_{mp} \sum_n \sum_o CPC_{mno} \\ &+ \sum_j CFR_j R_j + \sum_k CFR_k R_k + \sum_l CFR_l R_l + \sum_j \sum_p CUR_{jp} \sum_m \sum_o CRP_{jmop} \\ &+ \sum_k \sum_p CUR_{kp} \sum_m \sum_o CRP_{kmop} + \sum_l \sum_p CUR_{lp} \sum_m \sum_o CRP_{lmop} \quad (1.1) \\ &\max f_2 \left(\begin{matrix} CSR_{ijop}, CRP_{jmop}, CPC_{mno}, CSR_{ikop}, CRP_{kmop}, CSR_{ilop}, CRP_{lmop}, VSR_{ijoi} \\ VSR_{iko}, VSR_{ilo}, VRP_{jmo}, VRP_{kmo}, VRP_{lmo}, VPC_{mno}, R_j, R_k, R_l \end{matrix} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_p I_p \sum_m \sum_n \sum_o CPC_{mno} - \left[IT \left(\sum_i \sum_j \sum_o VSR_{ijoi} d_{ij}^{SR} \sum_l \sum_m \sum_p CSR_{ijop} \right. \right. \\ &\quad + \sum_i \sum_k \sum_o VSR_{iko} d_{ik}^{SR} \sum_l \sum_m \sum_p CSR_{ikop} \\ &\quad + \sum_i \sum_l \sum_o VSR_{ilo} d_{il}^{SR} \sum_l \sum_m \sum_p CSR_{ilop} \\ &\quad + \sum_j \sum_m \sum_o VRP_{jmo} d_{jm}^{RP} \sum_l \sum_k \sum_p CRP_{jmop} \\ &\quad + \sum_k \sum_m \sum_o VRP_{kmo} d_{km}^{RP} \sum_l \sum_j \sum_p CRP_{kmop} \\ &\quad + \sum_l \sum_m \sum_o VRP_{lmo} d_{lm}^{RP} \sum_l \sum_j \sum_p CRP_{lmop} \\ &\quad \left. + \sum_m \sum_n \sum_o VPC_{mno} d_{mn}^{PC} \sum_m \sum_n \sum_o CPC_{mno} \right) \\ &\quad + IK \left(\sum_m Cfe_m + \sum_l Cfe_l R_l + \sum_p Cve_p \sum_m \sum_n \sum_o CPC_{mno} \right) \\ &\quad \left. + II \left(\sum_m \alpha_m + \sum_l \beta_l R_l \right) + IA \sum_p Cva_p \sum_m \sum_n \sum_o CPC_{mno} \right] \\ &+ \sum_p IV_p \left(\sum_i \sum_j \sum_o CSR_{ijop} + \sum_i \sum_k \sum_o CSR_{ikop} + \sum_i \sum_l \sum_o CSR_{ilop} \right) \quad (1.2) \end{aligned}$$

La tercera función objetivo representada por la expresión 1.3 tiene implicaciones sociales, en esta se busca la maxi-

$$\max f_3 (CPC_{mno}) = \sum_m \sum_n \sum_o \sum_p CPC_{mno} \quad (1.3)$$

Restricciones

Las siguientes relaciones representan las restricciones que consideran que ningún flujo en la red que describe la cadena de suministro inversa de refrigeradores asuma valores superiores a los que se pueden recupera (Ecuaciones 1.4-1.26).

$$\sum_j \sum_o CSR_{ijop} + \sum_k \sum_o CSR_{ikop} + \sum_l \sum_o CSR_{ilop} \leq G_{ip}, \forall i, p \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \sum_m \sum_o CRP_{jmop} + \sum_m \sum_o CRP_{kmop} + \sum_m \sum_o CRP_{lmop} &\leq \sum_l \sum_o CSR_{ijop} \\ &+ \sum_l \sum_o CSR_{ikop} + \sum_l \sum_o CSR_{ilop}, \forall j, k, l, p \quad (1.5) \end{aligned}$$

$$\sum_m \sum_n \sum_o CPC_{mno} \leq \sum_i \sum_n CRP_{jmop} + \sum_l \sum_n CRP_{kmop} + \sum_l \sum_n CRP_{lmop}, \forall m, p \quad (1.6)$$

Expresión que garantiza que la capacidad del centro procesador no se exceda.

$$\sum_m \sum_o CPC_{mno} \leq C_{mp}, \forall m, p \quad (1.7)$$

Expresión que asegura que los flujos hacia los clientes no excedan su demanda.

$$\sum_m \sum_o CPC_{mno} \leq D_{np}, \forall n, p \quad (1.8)$$

Las expresiones siguientes representan la cantidad de viajes entre las fuentes (i) y los recolectores (j, k, y l); los recolectores (j, k y l) entre el centro procesador (m); así como entre el centro procesador (m) y los distintos clientes (n).

$$\sum_p \frac{CSR_{ijop}}{CT_{op}} + HSR_{ijoi} = VSR_{ijoi}, \forall i, j, o \quad (1.9)$$

$$\sum_p \frac{CSR_{ikop}}{CT_{op}} + HSR_{iko} = VSR_{iko}, \forall i, k, o \quad (1.10)$$

$$\sum_p \frac{CSR_{ilop}}{CT_{op}} + HSR_{ilo} = VSR_{ilo}, \forall i, l, o \quad (1.11)$$

$$\sum_p \frac{CRP_{jmop}}{CT_{op}} + HRP_{jmo} = VRP_{jmo}, \forall j, m, o \quad (1.12)$$

$$\sum_p \frac{CRP_{kmo}}{CT_{op}} + HRP_{kmo} = VRP_{kmo}, \forall k, m, o \quad (1.13)$$

$$\sum_p \frac{CRP_{lmo}}{CT_{op}} + HRP_{lmo} = VRP_{lmo}, \forall l, m, o \quad (1.14)$$

$$\sum_p \frac{CPC_{mno}}{CT_{op}} + HPC_{mno} = VPC_{mno} VSR_{ijo} + HSR_{ijo} \geq 0, \forall i, j, o \quad (-1 < HSR_{ijo} < 1) \quad (1.16)$$

$$VSR_{iko} + HSR_{iko} \geq 0, \forall i, k, o \quad (-1 < HSR_{iko} < 1) \quad (1.17)$$

$$VSR_{ilo} + HSR_{ilo} \geq 0, \forall i, l, o \quad (-1 < HSR_{ilo} < 1) \quad (1.18)$$

$$VRP_{jmo} + HRP_{jmo} \geq 0, \forall j, m, o \quad (-1 < HRP_{jmo} < 1) \quad (1.19)$$

$$VRP_{kmo} + HRP_{kmo} \geq 0, \forall k, m, o \quad (-1 < HRP_{kmo} < 1) \quad (1.20)$$

$$VRP_{lmo} + HRP_{lmo} \geq 0, \forall l, m, o \quad (-1 < HRP_{lmo} < 1) \quad (1.21)$$

$$VPC_{mno} + HPC_{mno} \geq 0, \forall m, n, o \quad (-1 < HPC_{mno} < 1) \quad (1.22)$$

$$\sum_i \sum_j VSR_{ijo} + \sum_i \sum_k VSR_{iko} + \sum_i \sum_l VSR_{ilo} + \sum_j \sum_m VRP_{jmo} + \sum_k \sum_m VRP_{kmo} + \sum_l \sum_m VRP_{lmo} + \sum_m \sum_n VPC_{mno} \leq Nv_o, \forall o \quad (1.23)$$

$$\sum_m \sum_o \sum_p CRP_{jmo} = R_j \sum_m \sum_o \sum_p CRP_{jmo}, \forall j \quad (1.24)$$

$$\sum_m \sum_o \sum_p CRP_{kmo} = R_k \sum_m \sum_o \sum_p CRP_{kmo}, \forall k \quad (1.25)$$

$$\sum_m \sum_o \sum_p CRP_{lmo} = R_l \sum_m \sum_o \sum_p CRP_{lmo}, \forall l \quad (1.26)$$

Adicionalmente se asume que todas las variables que representan flujo son continuas con valores positivos. Las variables que indican número de viajes entre dos puntos son enteras positivas. Las variables de holgura son continuas, mayores que -1 y menores que 1. Así como las variables binarias son enteras cuyos valores son mayor o igual a cero, y menor o igual a 1.

Para efectos de la optimización se recurrirá al método de frontera de Pareto, en el cual se realizará una primera optimización en donde se buscará a partir del planteamiento de diversos escenarios los valores óptimos de la función objetivo que representa el costo, asumiendo como restricciones las funciones que expresan el impacto ambiental y el nivel de servicio al cliente. Una vez hecha esta optimización se procederá a una segunda, en donde la función objetivo que mide el nivel de servicio al cliente sea optimizada, y además de las restricciones planteadas, se agreguen las funciones y objetivos de costo y de impacto ambiental, repitiéndose este proceso iterativo con la función objetivo de impacto ambiental.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta la oportunidad que se obtiene en la

recuperación de electrodomésticos de manera general desde la perspectiva económica y de generación de empleos, pero supone a su vez retos estructurales que limitan la posibilidad de extender el impacto positivo de la cadena de logística inversa en este sector. Entre las principales dificultades se pueden encontrar:

- » Altos consumos de combustible, recursos y servicios, como agua y electricidad.
- » Altos niveles de consumo de sustancias como: bicarbonato de sodio (Na_2CO_3), sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), carbonato de calcio (Ca_2CO_3)
- » Elevados niveles de emisiones al aire de: malos olores, polvo, monóxido de carbono (CO), cloruro de hidrogeno (HCl), SOx, NOx,
- » Incremento del nivel de pH del agua y contaminación al agua con sustancias nocivas como: cinc (Zn), cobre (Cu), COD, SS, N-H.
- » Insuficientes niveles de aprovechamiento de materiales recuperables tales como metales ferrosos y no ferrosos y otros.
- » Altos costos de transportación, almacenamiento y procesamiento de los materiales.
- » Pérdidas económicas por no aprovechamiento de materia prima disponible.
- » No aprovechamiento de las oportunidades de empleo que genera la cadena.
- » Bajos niveles de ingreso para los trabajadores.
- » Bajos niveles de satisfacción de la industria y de la comunidad con el funcionamiento de la cadena.

Estas dificultades, entre otras, constituyen una barrera para garantizar la sostenibilidad de la cadena logística asociada a la recuperación del valor residual de los electrodomésticos, sin embargo, una adecuada gestión de la cadena de suministro inversa representa también la capacidad de recuperar parte de la inversión para producir el bien en cuestión, el desarrollo de políticas públicas que aporten a su estandarización como práctica regular, el establecimiento de modelos industriales que incluyan el reciclaje en lugar de desechar lo que no se usa, la reducción de la contaminación ambiental como consecuencia de esta práctica y la generación de capacidades para poblaciones con menos recursos.

En ese sentido, destacan algunas de las conclusiones más importantes de este estudio entre las que se incluyen:

- La aplicación del modelo multiobjetivo permitió comprobar su utilidad para el rediseño de una cadena de suministro inversa para electrodomésticos, con una

mejora notable en parámetros como ahorro en el costo, disminución del impacto ambiental y satisfacción al cliente.

- El modelo multiobjetivo propuesto representa un aporte científico y metodológico, ya que considera no solo los aspectos económicos sino también los ambientales y sociales permitiendo tomar mejores decisiones sobre la forma en cómo debería estar configurada la red que describe la cadena de suministro inversa objeto de estudio.
- La comprobación de la utilidad práctica del modelo multiobjetivo propuesto para el análisis de la cadena de suministro inversa para electrodomésticos de fin de uso plantea la posibilidad de ser replicado en otros escenarios, siempre y cuando se adapten a los supuestos que aplican a este modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Feitó Cespón, M. (2016). Modelo multiobjetivo para el rediseño de cadenas de suministro sostenibles de reciclaje, bajo condiciones de incertidumbre. Aplicación a la recuperación de plásticos en Cuba. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Feitó Cespón, R. (2011). Administración de la cadena de suministro. Planeación, información y control. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/265963575_Administracion_de_la_cadena_de_suministros

Hevia, F. (2008). Metodología de diseño de la cadena de suministro inversa. Una contribución a la logística reversa. Documento inédito. (Tesis doctoral). La Habana: Universidad de La Habana.

Mar, J., & García, M. (2015). Logística inversa: prácticas actuales, tendencias futuras y oportunidades de investigación. QUID: Investigación, Ciencia y Tecnología, 31-40. Recuperado de <http://revistas.proeditio.com/iush/quid/index>