

A comprehensive process for the management of e-waste

Proceso integral para la gestión de RAEE

Mayra Corona Andrade^{1*}, Guillermo Cortés Robles², Constantino Gerardo Moras Sánchez³, Jesús Delgado Maciel⁴, Víctor Ricardo Castillo Intriago⁵

^{1*} Mtra. en Ingeniería Administrativa, m10010295@orizaba.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0006-6538-6962>, Tecnológico Nacional de México, Orizaba, México

² Doctor en Sistemas Industriales, guillermo.cr@orizaba.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8857-7143>, Tecnológico Nacional de México, Orizaba, México

³ Mtra. en Ingeniería Industrial, m10010295@orizaba.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5178-6662>, Tecnológico Nacional de México, Orizaba, México

⁴ Doctor en Ciencias, jesus.dm@orizaba.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1549-5013>, Tecnológico Nacional de México, Orizaba, México.

⁵ Doctor en Planeación Estratégica y Dirección Tecnológica, victor.ci@orizaba.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2931-4914>, Tecnológico Nacional de México, Orizaba, México.

How to cite: M. Corona-Andrade, G. Cortés-Robles, C. G. Moras-Sánchez, J. Delgado-Maciel, y V. R. Castillo-Intriago, "Proceso integral para la gestión de RAEE", *Respuestas*, vol. 29, n.º 3, sep. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4868>

Received on February 15, 2024 - Approved on July 24, 2024.

ABSTRACT

Keywords:

Circular Economy;
Reverse logistics; E-waste.

This research aims to design a comprehensive supply chain and reverse logistics process to incorporate some circular economy concepts to achieve efficient and sustainable management of Waste from Electrical and Electronic Equipment (e-waste or WEEE). The integration of these approaches uses the Design Thinking (DT) methodology. During the use of DT, it was possible to identify the needs and challenges of some crucial actors; some ideas were generated to solve the problem, and the need for a process to observe the entire cycle of WEEE to move from a linear economy to a circular economy emerged. The result was the creation of a comprehensive process showing how to execute this transition. The process was outlined in a diagram that includes seven phases: obtaining raw materials, manufacturing parts, manufacturing equipment, distribution, marketing, consumption, and management of e-waste. The process shows how to correctly reintegrate materials and components into the production cycle, minimizing the environmental impact and promoting the circular economy. This process is original since it has a sustainable approach considering the necessary stages to manage the e-waste efficiently.

RESUMEN

Palabras clave:

Economía Circular;
Logística inversa; RAEE.

El objetivo de esta investigación es diseñar un proceso que contemple la cadena de suministros y la logística inversa, para incorporar conceptos de la economía circular con la finalidad de lograr la gestión eficiente y sostenible de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Para la integración de estos enfoques se empleó el pensamiento de diseño o Design Thinking (DT). La aplicación de DT permitió identificar las necesidades y desafíos de los actores involucrados, se generaron ideas sobre las posibles soluciones y se determinó que es necesario realizar un proceso en el que se contemple el ciclo completo de RAEE para moverse de una economía lineal a una economía circular, aplicada a la gestión de estos residuos. El resultado fue la creación de un proceso integral que muestra cómo realizar esta transición. El proceso mencionado, fue esquematizado en un diagrama de siete fases que son: obtención de materias primas, fabricación de piezas, fabricación de equipo, distribución, comercialización, consumo y gestión de RAEE. El proceso muestra como realizar la correcta reintegración de materiales y componentes al ciclo de producción, minimizando el impacto ambiental y fomentando la economía circular, dicho proceso es original ya que tiene un enfoque sostenible que considera las etapas necesarias para llegar a una eficiente gestión de los RAEE.

*Corresponding author.

E-mail Address: m10010295@orizaba.tecnm.mx (Mayra Corona-Andrade)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

Los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) han adquirido un papel fundamental en la vida diaria, funcionando mediante energía eléctrica y campos electromagnéticos. Cuando los usuarios optan por desechar estos dispositivos debido a que ya no cumplen con sus necesidades o expectativas, se transforman en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). La generación de estos residuos puede derivarse de diversos factores, tales como la obsolescencia de los dispositivos, la búsqueda constante de actualización tecnológica por parte de los consumidores o avances tecnológicos significativos, entre otros motivos. La humanidad ha generado 53.6 Mt de RAEE en 2019, como se muestra en la *Figura 1*:



Figura 1. Generación de RAEE por continente [1].

En México, los RAEE se desechan sin tomar en cuenta la normativa y las repercusiones que, en términos de impacto ambiental, social y de salud pueden tener estas sustancias. Cabe destacar que los RAEE deben ser desechados de una forma distinta a la basura común. La gestión de los RAEE consiste en un conjunto de acciones que se realizan para el manejo de dichos residuos, algunas acciones son la recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, reciclaje y disposición final, que es la acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones que permitan prevenir su liberación al ambiente [36].

En América Latina, México se posiciona como el segundo mayor generador de basura eléctrica y electrónica [2], [3], [4]. Anualmente, México produce más de 1.29 millones de toneladas de basura eléctrica y electrónica, lo que equivale a aproximadamente 3.54 millones de kilogramos por día. Sin embargo, solo se recolecta de manera formal alrededor de 7.12 kilogramos diarios, representando un modesto 0.20% del total de residuos electrónicos y eléctricos [5].

Los RAEE plantean un desafío creciente en términos de gestión ambiental y sostenibilidad. Se ha identificado que la logística inversa es una solución efectiva para abordar esta problemática, permitiendo la recuperación y el aprovechamiento de los componentes y materiales valiosos presentes en los RAEE. No obstante, los modelos propuestos carecen de un desglose detallado de cada fase o subfase que debe llevarse a cabo. Además, no incorporan de manera explícita las estrategias fundamentales de la economía circular. En su mayoría, se limitan a considerar el reciclaje como un proceso genérico en lugar de abordar sus distintas facetas. Dadas las consideraciones anteriores, surge la necesidad de desarrollar un proceso integral que combine principalmente el proceso de producción (cadena de suministros), la logística inversa y las estrategias de economía circular, con la finalidad de fomentar la gestión sostenible de los RAEE y promover la economía circular. Para fundamentar teóricamente este enfoque, es crucial definir los conceptos clave involucrados (cadena de suministros, logística inversa, economía circular y sus estrategias y la cadena de

suministros sostenibles). Esta comprensión es esencial para establecer sus interconexiones y avanzar hacia una implementación efectiva de este proceso integral.

A. La interrelación entre cadena de suministro, la logística, la logística inversa y la economía circular en AEE

La cadena de suministro representa una red global para la entrega de productos y servicios, gestionando información, distribución física y transacciones financieras [6]. Esta cadena abarca todas las etapas de producción [7], desde la adquisición de materias primas hasta la fabricación de piezas, la producción de los AEE, su distribución y consumo. A lo largo del tiempo, se ha consolidado una cultura de consumo constante, donde se realiza un proceso recurrente que consiste en la extracción de materias primas, fabricación, compra, consumo y desecho, a este proceso se le denomina economía lineal [8].

Dentro de esta cadena de suministro, la logística desempeña un papel crucial, definido por el Consejo de Dirección Logística [9], como la planificación, ejecución y control eficiente del flujo y almacenamiento de mercancías, servicios e información, desde su origen hasta el consumo, con el objetivo de satisfacer las necesidades de los clientes. En el contexto de los AEE, la logística se encarga de todas las actividades necesarias para que el usuario finalmente obtenga un AEE, sin tomar en cuenta los desechos que se deriven de esta actividad.

Con el fin de combatir los desechos generados del consumo, existe la logística inversa que, a diferencia de la logística tradicional que se termina en la fase de consumo de la cadena de producción, se centra en las actividades posteriores que ocurren cuando el usuario identifica un producto como residuo electrónico [10], y cuyo objetivo es realizar la gestión de productos, materiales, componentes o residuos para que regresen a su origen y así promover la sustentabilidad [11]. La logística inversa ayuda a prolongar la vida útil de los productos electrónicos y sus componentes, reintegrándolos en la cadena de producción, lo que contribuye al concepto de economía circular. Asimismo, la economía circular, definida por Espaliat Canu (2017) [8], se opone al modelo lineal y busca regenerar y reparar productos, componentes y recursos para mantener su utilidad y valor continuamente. Este enfoque implica un ciclo constante de desarrollo positivo que conserva y mejora el capital natural, optimiza el uso de los recursos y minimiza los riesgos al gestionar existencias finitas y flujos renovables [12].

En virtud de lo expuesto, se puede afirmar que la economía circular aspira a una transformación del paradigma del sistema de producción lineal (que comprende la extracción de materias primas, la fabricación, el consumo y la eliminación) hacia un modelo en el cual los productos, sus materiales, recursos y componentes se incorporan en un ciclo constante de utilización, recuperación, tratamiento y reutilización, condición que se ilustra en la *Figura 2*:

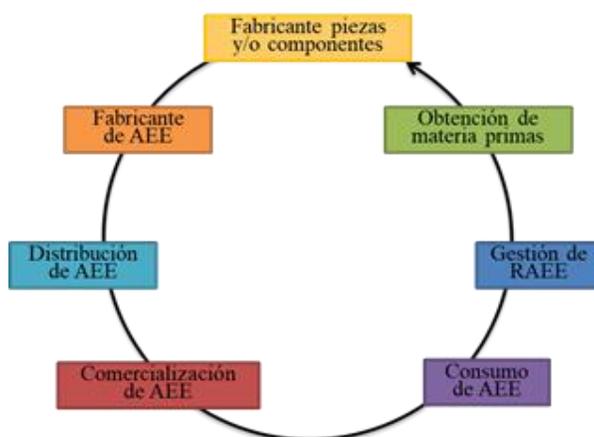


Figura 2. Modelo de la economía circular [8], [13]

La economía circular requiere la cooperación de diversos participantes, que incluyen a fabricantes, distribuidores, consumidores, empresas de logística y recicladores, con el fin de garantizar una administración eficaz y sustentable de los RAEE. Esta colaboración fomenta la responsabilidad compartida y crea conciencia sobre la importancia de una disposición adecuada de los desechos eléctricos y electrónicos.

La economía circular sugiere diversas acciones orientadas a disminuir el uso de recursos naturales, materiales y la producción de residuos, como son el rehusar, reparar, restaurar, reciclar, reutilizar, reducir, remanufacturar, readaptar, rediseñar o recuperar [14] Estas estrategias se agrupan bajo la denominación de "las R de la economía circular" debido a que todas ellas tienen en común el hecho de iniciar con la letra R [15].

Existe un concepto en lo que se refiere a la cadena de suministros, añadiendo el término sostenible (CdSS). Este enfoque señala que en cada etapa del proceso productivo se implementen estrategias como la reducción consumo de agua y energía, disminución de la contaminación, mejora de condiciones laborales de los trabajadores, bioseguridad, apoyo a comunidades marginadas, la biodiversidad y mejor uso de la tierra [16], con el objetivo de equilibrar el beneficio económico con la protección del medio ambiente y el bienestar social, contribuyendo así a un desarrollo responsable y sostenible [17]. Por lo anterior, este concepto puede incluir la aplicación de la logística inversa, sin embargo, sus objetivos son distintos, ya que la CdSS se centra en estrategias que deberán realizarse durante el proceso de producción, mientras que la logística inversa, como se mencionó, se dirige a la recuperación y el retorno de productos, materiales y/o componentes derivados del consumo. Si bien ambos conceptos son fundamentales para promover acciones sostenibles y fomentar la economía circular, es importante hacer mención de que en este artículo solo se consideran las etapas del proceso productivo, que forman parte de la cadena de suministros, sin tomar en consideración todas las actividades sostenibles que se pueden realizar durante dicho proceso.

Se consideran las distintas fases del proceso productivo con el propósito de cerrar en el ciclo y visualizar como los materiales o componentes recuperados, tras la implementación de la logística inversa, son reintegrados a dicho proceso. Esta unión busca mostrar que el objetivo de la logística inversa se cumple. En consecuencia, la logística inversa fomenta la economía circular al reincorporar productos y materiales en el ciclo de producción en lugar de desecharlos, lo que resulta en una gestión efectiva y sostenible de los RAEE. Sin embargo, para lograr un modelo más sustentable, es esencial contar con una guía que indique

dónde y cómo aplicar las estrategias que conforman las "R" de la economía circular en todas las etapas del proceso de producción.

Materiales y Métodos

Para la creación del proceso, se empleó el Design Thinking (DT) o pensamiento de diseño con sus cinco etapas [18]. Los puntos siguientes ofrecen una concisa descripción de las etapas del DT:

1. Empatizar: Se realizó una investigación teórica y práctica que abarcó los conceptos de logística inversa, la cadena de suministro, la economía circular, los dispositivos eléctricos y electrónicos, así como la gestión de residuos. Además, se utilizaron herramientas como el mapa de actores, el análisis PESTEL y la encuesta, con el fin de evaluar la situación actual de la gestión de RAEE en la ciudad de Orizaba. Esta etapa permitió comprender a fondo las necesidades, deseos, desafíos de los actores, así como el panorama real del desecho de los RAEE.

2. Definir: Se identificaron las principales problemáticas relacionadas con la implementación de la logística inversa. Los desafíos más significativos incluyen la falta de información precisa sobre la generación y recolección de RAEE, tanto de manera formal como informal. Además, la falta de conciencia sobre los riesgos para la salud de quienes realizan la recolección informal y la falta de conocimiento sobre el impacto ambiental de estos residuos. También se detectó la necesidad de mejorar la interrelación y comprensión entre la cadena de suministro, la logística inversa y la economía circular.

3. Idear: Derivado de necesidad de establecer la interrelación entre la cadena de suministro, la logística inversa y la economía circular, se elaboraron diversos procesos que integraron las etapas de la logística inversa junto con los componentes clave de la cadena de suministro, incorporando las R de la economía circular. Para respaldar la viabilidad de este proceso, se consultaron diversas perspectivas de autores relevantes en el campo, los cuales ofrecieran una contribución teórica y conceptual sólida y coherente, que presentaran casos de estudio sobre el tema y que fueran reconocidos en la comunidad científica o bien, tuvieran un impacto en el contexto actual. La Tabla 1 es un resumen las etapas de los trabajos más destacados que sirvieron como una base teórica para la creación del proceso integral para la gestión de RAEE:

Tabla 1. Análisis de las fases de la logística inversa

Etapas persistentes en la logística inversa	Autores										R de la economía circular persistentes	Autores									
	[19]	[20]	[21]	[22]	[12]	[23]	[10]	[24]	[25]	[19]		[20]	[21]	[22]	[12]	[23]	[10]	[24]	[25]		
Materias primas	X	X	X	X	X	X					Reciclaje ¹	X	X	X		X	X				
											Reutilización				X						
Fabricación materias primas, piezas o componentes	X	X	X	X	X	X		X	X		Rehusar								X		
											Reciclaje				X						
											Remanufactura o refabricación		X	X	X	X					
											Reutilización		X	X		X					
											Reducir							X	X	X	
											Readaptar										
Distribución		X	X	X		X		X	X		Reducir						X				
											Rehusar						X				
											Restauración				X						
											Devoluciones		X	X							
Uso del producto (consumo)	X	X	X	X	X	X		X	X		Rehusar										
											Reutilizar		X	X			X	X	X	X	
											Reparar o mantener					X		X	X	X	
											Reacondicionar										
											Remanufactura o refabricación						X		X	X	
											Readaptar						X	X	X	X	
											Mercados secundarios				X						
Recolección y selección	X				X	X	X	X	X		Recuperar	X					X	X			
											Recuperación de energía	X				X			X	X	
Reciclaje	X							X	X		Reciclaje	X						X			
Tratamiento						X	X				-										
Transporte y almacenamiento						X	X				-										
Retoma Productos						X					Reparar						X				
											Remanufacturar								X	X	
											Repropósito o rediseño				X		X		X	X	

Para el desarrollo del proceso, se priorizó la inclusión de las etapas comunes de los modelos de logística inversa y de todos los principios de la economía circular. Así, la viabilidad del proceso integral para la gestión de RAEE se fundamenta en su coherencia con los conceptos establecidos de cadena de suministros, logística inversa y la economía circular. Se basa en la revisión crítica de la literatura existente, que incluye la obra de autores influyentes en el campo como [10], [12], [14], [15], [19], [22], [23], [24], con el fin de establecer la fundamentación teórica que respalda la factibilidad y efectividad del nuevo proceso propuesto.

El proceso integral para la gestión de RAEE no solo es consistente de forma teórica, sino que también ofrece una contribución adicional al campo al interrelacionar las fases de la cadena de suministros, las etapas de logística inversa y colocar las estrategias de la economía circular como subfases dentro un proceso único, mostrando de forma clara una secuencia sugerida del despliegue de cada subproceso. Este enfoque permitió crear una versión personalizada y contextualizada que facilita la consistencia y eficacia del proceso de gestión para los RAEE y fomentar de forma efectiva la economía circular.

4. Prototipar: Tomando en cuenta las fases y subfases definidas, se desarrolló una representación visual de la interacción entre la cadena de suministro, la logística inversa y la economía circular. Este esquema ofrecerá una visión clara y precisa de cómo estos componentes se entrelazan y colaboran de forma eficaz y eficiente.

5. Probar: Mediante la simulación de eventos discretos, se creó un sistema de producción de servicios que contempla el proceso propuesto. Este proceso se encuentra en evaluación por medio de una razón económica-ambiental.

Diseño experimental y análisis estadístico

Es importante señalar que la encuesta se diseñó utilizando una escala nominal de naturaleza cualitativa, con el objetivo de identificar el proceso actual en lugar de evaluarlo. Para validar la confiabilidad de este tipo de encuestas, se sugiere el uso del "alfa ordinal", que es un coeficiente destinado a evaluar la consistencia interna de encuestas con variables nominales u ordinales [28]. Este coeficiente es equivalente al conocido "alfa de Cronbach", empleado en escalas de razón, ordinales o de intervalo [29]. El alfa ordinal se adapta específicamente a encuestas con respuestas nominales u ordinales.

El cálculo del alfa ordinal se basa en la correlación policonómica, que mide la asociación entre los elementos de la encuesta considerando el orden o jerarquía de las categorías de respuesta. Esto implica el cálculo de pesos factoriales. Aunque actualmente no hay software disponible para calcular automáticamente este índice de confiabilidad, el autor [30] desarrolló una base de datos que, mediante pesos factoriales, realiza automáticamente el cálculo del alfa ordinal. El resultado de este coeficiente varía entre 0 y 1, siendo valores cercanos a 1 indicativos de una mayor consistencia interna de los elementos. Generalmente, se considera que un coeficiente alfa ordinal superior a 0.7 es aceptable. Con base en lo anterior, se calcularon los pesos factoriales en el programa Minitab y posteriormente con la calculadora en Excel se determinó que el índice de confiabilidad de la encuesta realizada fue de 0.81. Con base en lo expuesto, se calcularon los pesos factoriales utilizando el programa Minitab. Posteriormente, mediante la calculadora en Excel, se determinó que el índice de confiabilidad de la encuesta realizada fue de 0.81.

Resultados y Discusión

Se identificaron actores clave en el proceso, como consumidores y gestores de residuos, que desempeñan roles fundamentales en la gestión de AEE. Además, se encontraron aspectos críticos en las actividades de los usuarios, como la exposición de las causas de fallo de los AEE y la toma de decisiones sobre su tratamiento, junto con los protocolos para la negociación y entrega de los AEE. De igual forma y derivado de la encuesta, se estimó que en los hogares de Orizaba hay alrededor de 536 mil AEE, con una rotación promedio de 5 años debido a avances tecnológicos, averías o el fin de su vida útil, lo que los convierte en residuos electrónicos. De estos residuos, el 37% se somete a reparación o mantenimiento, el 22% se descarta directamente, el 18% se dona, el 17% se vende, el 4% se almacena y el 2% se coloca en consignación.

Una vez detectado el panorama real, se propusieron diversas etapas que pudieran conformar al proceso, y finalmente se obtuvo un proceso integral para la gestión de RAEE, que se centra en las fases siguientes:

1. Obtención de materias primas [22]: Normalmente, la obtención se realiza mediante la extracción de materia prima. En el proceso propuesto la obtención también se realizaría a través del reciclaje o reutilización, sin perder de vista parámetros de calidad, disponibilidad y costo.

2. Fabricación de piezas y/o componentes [22]: En esta fase se ejecuta la producción de partes individuales que conforman el producto final, lo que se desea es que el fabricante diseñe y produzca piezas que sean sostenibles esto quiere decir que utilice pocas materias primas y que el uso de estas piezas sea intensivo, sin perder calidad y tomando en cuenta los costos.

3. Fabricación de AEE [19]: En esta etapa se integran todas las piezas, componentes y materias primas. Por lo que los fabricantes deberían diseñar los AEE cumpliendo con criterios de sostenibilidad y se nieguen a la aplicación de la obsolescencia programada (práctica intencional y deliberada de los fabricantes para calcular y planificar el tiempo de vida de sus productos, una vez que llega ese momento, el AEE deja de funcionar[37]), que su ciclo de vida sea de uso intensivo y multifuncional, además de que se rechacen o reutilicen piezas, materiales y componentes de dudosa o limitada función, y que colaboren para alargar la vida útil de un aparato.

4. Distribución de AEE [22]: Este proceso implica la gestión de inventarios, el almacenamiento de los AEE, la selección de las rutas de transporte y la coordinación de tiempos de entrega, lo anterior no solo tiene un impacto favorable en la eficacia de los recursos sino de la reducción de daños al medio ambiente.

5. Comercialización de AEE: Son las series de actividades relacionadas con la venta de AEE, se espera que no solo sean nuevos AEE sino también readaptados, con el fin de alargar la vida útil de estos aparatos.

6. Consumo del AEE [19], [22]: Se da cuando el consumidor compra un AEE. En esta fase se debe fomentar un mercado donde el consumidor, no solo compre en una razón precio/producto, sino que también tome en cuenta y compare un aparato en función de otras características como la durabilidad, la facilidad de utilización, la facilidad de reparación, entre otras, y que pueda observar el impacto de aquellos equipos que no cumplan con características de sustentabilidad, y los rechace. Igualmente se deberá animar a la compra de artículos reacondicionados, que cumplan con las normativas establecidas. Esta etapa concluye al momento que el usuario considera que sus AEE se convierten en RAEE.

7. Gestión del RAEE: Son todas aquellas actividades realizadas para el manejo apropiado de los desechos derivados del consumo y hasta su disposición final. Esta fase deberá tener como objetivo aminorar los impactos al medio ambiente, a la salud pública y fomentar la economía circular, mediante la recuperación de componentes o materiales que se encuentren en los RAEE. Dentro de sus principales subetapas, se deberán considerar las siguientes:

- **Recolección de los RAEE** [10], [19], [23]: Se deberá implementar un sistema de recolección mediante puntos específicos, recolección de casa en casa o programas de recolección. Lo importante es que los RAEE sean separados correctamente de los desechos comunes y canalizados hacia un proceso de gestión adecuado.

- Envío al centro especializado [10]: Una vez que los RAEE sean recolectados deberán ser transportados de forma segura desde los puntos de recolección hasta las instalaciones de tratamiento y procesamiento. Por lo que se sugiere identificar estos centros o bien fomentar la creación de ellos. Este traslado implica la utilización de vehículos y embalajes adecuados que cumplan con la normatividad establecida de transporte de materiales peligrosos, minimizando así los riesgos asociados con los residuos electrónicos.

- Diagnóstico y clasificación [23]: Una vez que el RAEE llega al centro especializado se deberá realizar un diagnóstico y clasificación para determinar su estado, funcionalidad y potencial de reutilización o reciclaje. Esto ayuda a identificar los dispositivos que pueden ser reparados, reacondicionados, despiezados o bien se puedan extraer sus materiales o componentes, con el fin de dar el tratamiento adecuado.

- Tratamiento adecuado [19]: Una vez realizado el diagnóstico y clasificación de los RAEE, deberán ser tener tratamientos apropiados de acuerdo con sus características y regulaciones ambientales. Esto puede incluir procesos de mantenimiento, reparación, reacondicionamiento, despiece, desensamble, reutilización o reciclaje. En caso de ser diagnosticados para mantenimiento, reparación o reacondicionamiento se realiza el proceso y el RAEE se convertiría en AEE funcional listo para reintegrarse a la comercialización y posteriormente al consumo, condición que alarga la vida útil, disminuye la extracción de materias primas y reduce los impactos ambientales. En caso de que el RAEE sea diagnosticado para despiece se extraen las piezas servibles y se almacena para ser utilizadas en la reparación o reacondicionamiento. Otro escenario es que estos componentes podrían ser enviados a la fabricación de AEE, para ser reutilizados, siempre que cumplan con los estándares de calidad previamente establecidos. Si el diagnóstico fuera el desensamble completo de materiales o componentes, se deberá clasificar de acuerdo con lo siguiente:

- o Materiales peligrosos como son mercurio, cromo, cadmio y fósforo, arsénico y antimonio [31], [32].
- o Fluidos como refrigerantes y aceites.
- o Pilas en contenedores especiales.
- o Materiales no peligrosos como plástico, vidrio, metales ferrosos (hierro y acero), metales no ferrosos (plomo, cobre plata, aluminio, latón, oro, zinc, titanio, paladio, níquel) [33].
- o Metales estratégicos como son el litio, el galio, el estaño, el tántalo o indio [34].

Una vez realizada la clasificación anterior, se debe valorizar los materiales y en su caso, venderlos a las empresas que se encarguen de su tratamiento final. Dichas empresas brindarán el tratamiento adecuado y venderán la nueva materia prima al fabricante que lo requiera. Lo anterior tiene el fin de maximizar la recuperación de materiales valiosos, reducir la cantidad de residuos peligrosos y no peligrosos enviados a rellenos sanitarios y minimizar los impactos ambientales negativos y, por supuesto, fomentar la economía circular.

A pesar de que con lo anterior se fomenta la economía circular, es importante considerar las R de dicho término, para mostrar explícitamente en que etapas del proceso se emplean. Para las R de la economía circular [14], [15], se definieron como sigue en orden de importancia:

- **Rehusar o rechazar** productos que cuentan con una función limitada, su consumo de energía sea excesivo, la tecnología de carga esté obsoleta y su sistema no pueda ser desmontado imposibilitando el reemplazo de sus piezas y su reparación.
- **Reducir** el consumo mediante el incremento de la eficiencia en la fabricación y uso a través del ecodiseño, fomentando la aplicación de la eficiencia energética en los AEE.
- **Rediseñar o repensar** con criterios de sostenibilidad como realizar productos de uso intensivo o multifuncionales, sin implementar practicas negativas como la obsolescencia programada.
- **Reutilizar o reusar** productos en buen estado o plenamente funcionales y que estos hayan sido desechados por otro consumidor.
- **Reparar**, arreglar o dar mantenimiento a un producto para alargar su vida útil.
- **Restaurar o reacondicionar** productos usados o antiguos para reestablecer su funcionalidad y aspecto.
- **Remanufacturar o reconstruir** aquello que se necesita o usar partes de productos que fueron desechados y tienen la misma función.
- **Readaptar** alguna parte de un producto desechado en un nuevo producto con una función distinta.
- **Reciclar** materiales que fueron desechados y recuperados para obtener materias primas de igual calidad, para extender su vida útil.
- **Recuperar** energía, mediante la incineración de materiales.

Una vez definidas cada una de las etapas se obtuvo el siguiente proceso para la gestión de RAEE, *Figura 3*:

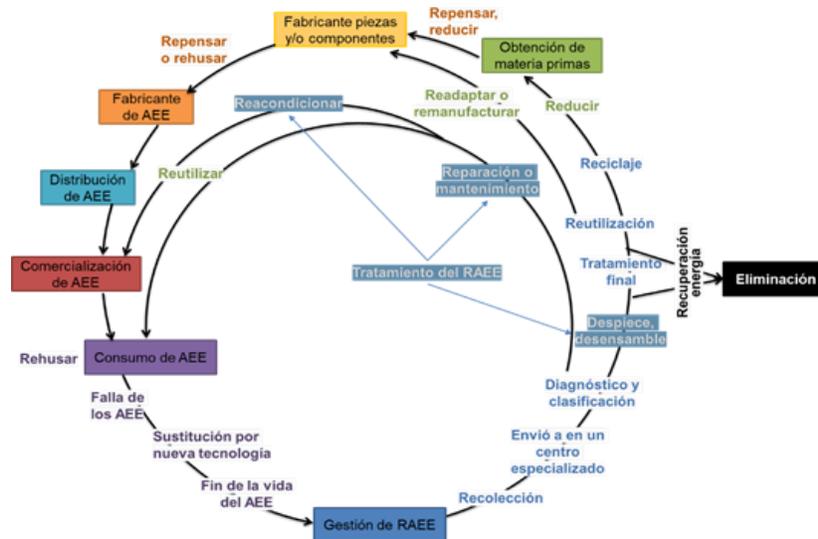


Figura 3. Proceso integral para la gestión de RAEE

El proceso tiene un enfoque que abarca las etapas de la cadena de suministro, los principales pilares de la logística inversa y las R de la economía circular, por lo que es un proceso diseñado desde una perspectiva para asegurar una gestión efectiva y sostenible de los RAEE. Adicionalmente, se puede resaltar que con la aplicación del proceso se obtendrían beneficios ambientales de ahorros de hasta 744 ton de CO₂e que se traducen a 892 mil pesos aproximadamente, tomando en cuenta que el precio por tonelada de CO₂e oscila entre los 40 y 80 USD, según cifras del [35], esta estimación se obtuvo con base en los resultados de la encuesta aplicada.

El proceso se distingue por su carácter innovador y su adaptabilidad a las condiciones cambiantes del entorno, los diagramas propuestos por [19], [24], [27] solo toman en consideración al reciclaje como un proceso integral, sin considerar todas las estrategias de la economía circular, otros procesos como los de [12], [14], [15] solo toman en consideración las estrategias de la economía circular sin la interrelación con la logística inversa o autores como [20], [21], [22] se limitan a abordar las etapas hasta el consumo y la reintegración al proceso de producción en lo que se refiere a la logística inversa. Por lo que el proceso integral para la gestión de RAEE, es una solución efectiva ya que interrelaciona todos los conceptos propuestos por los autores mencionados.

Conclusiones

Una cadena de suministro coordinada y eficiente facilita la implementación de la logística inversa y fomenta la economía circular. La logística inversa es fundamental para la gestión de los RAEE, mientras que la economía circular promueve la reutilización y reciclaje de los componentes y materiales extraídos de los RAEE. A su vez, la logística inversa y la economía circular pueden mejorar la sostenibilidad y competitividad de la cadena de suministro. Establecer un proceso donde muestre explícitamente la interrelación de estos conceptos es fundamental para lograr una gestión eficiente y sostenible de los RAEE, ya que estos conceptos se complementan entre sí, permitiendo aumentar el valor de los productos y materiales, reducir el impacto ambiental y fomentar la economía circular. Al integrar estos tres conceptos, se genera una nueva perspectiva conceptual y teórica que aborda problemas de sostenibilidad y gestión de recursos. Esta innovación fomenta

la investigación interdisciplinaria y proporciona una base para el desarrollo de nuevos marcos teóricos. Adicionalmente facilita el diseño y la implementación de prácticas más sostenibles que pueden traducirse en estrategias empresariales que promueven la economía circular y la gestión sostenible de recursos.

El proceso se centró en 7 fases que son: obtención de materias primas, fabricación de piezas y/o componentes, fabricación de AEE, distribución de AEE, comercialización de AEE, consumo del AEE y gestión del RAEE. Dentro de la fase 7 existen cuatro subfases que son: recolección de los RAEE, envío al centro especializado, diagnóstico y clasificación, y finalmente tratamiento. Para incorporar las estrategias de la economía circular, se deberán emplear las siguientes: acciones: rehusar o rechazar, reducir, rediseñar o repensar, reutilizar o reusar, reparar, restaurar, remanufactura, o reconstruir, readaptar, reciclar y recuperar. El desarrollo de este proceso es crucial para impulsar la transición hacia un método más sostenible y responsable en el tratamiento de los RAEE. Con su aplicación se reduce la generación de residuos, se promueve el uso sostenible de los recursos en beneficio del medio ambiente además de la gestión eficiente de los productos al final de su vida útil y su reintegración en la cadena de suministro lo que se puede traducir a la reducción de los costos asociados con la eliminación de residuos y la adquisición de materias primas. Adicionalmente la economía circular fomenta la innovación y la creación de nuevos modelos de negocio. Además, al implementar este proceso, se sentarán las bases para una economía circular efectiva y respetuosa con el medio ambiente.

Sin embargo, esta integración requiere de un mayor esfuerzo científico para validar todas sus implicaciones, debido a que puede tornarse complejo y desafiante al momento de realizar la reintegración de los materiales o componentes al proceso productivo, ya que requerirá de una correcta planificación y coordinación, de igual forma la inversión inicial es significativa en lo que puede

referirse a la infraestructura, tecnología y personal, de igual manera se debe fomentar una cultura de cambio dentro de la sociedad lo que lo puede significar resistencia al cambio. Otra dificultad es que la economía circular a menudo implica la colaboración de varios actores, como proveedores, consumidores y recicladores. La falta de cooperación puede obstaculizar el proceso.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología de México mediante el número de becario 1137602, el soporte del Tecnológico Nacional de México y de la Red de Optimización de Procesos Industriales por las facilidades ofrecidas para la elaboración de este proyecto.

Referencias

- [1] C. P. Baldé, E. D'Angelo, V. Luda, O. Deubzer, and R. Kuehr, "Global Transboundary E-waste Flows Monitor 2022," 2022.
- [2] IKI Alliance, "Residuos electrónicos en México y su potencial consumo sustentable." Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available: <https://iki-alliance.mx/residuos-electronicos-en-mexico-y-su-potencial-consumo-sustentable/>
- [3] Statista, "E-waste: generación de residuos-e en México | Statista." Accessed: Jan. 15, 2023. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1215540/generacion-residuos-electronicos-mexico/>
- [4] IKI Alliance, "Consumo sustentable y reciclaje de residuos electrónicos: México y Alemania," 2018. [Online]. Available: www.international-climate.initiative.com
- [5] INEGI, "Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares," 2021.

- [6] J. Acevedo, A. J. Urquiaga, and M. Gómez, “Gestión de la Cadena de Suministro,” 2011. [Online]. Available: https://trellischile.tripod.com/archivos/FOLLETO_SCM.pdf
- [7] A. Iglesias, “La gestión de la cadena de suministro,” ESIC. Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=wpkkDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [8] M. B. Falappa, M. Lamy, M. Vazquez, and L. E. Bohm, “De una Economía Lineal a una Circular, en el siglo XXI,” 2019.
- [9] R. Ballou, *Logística Administracion de la cadena de suministro*. 2004. Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/16236982/Logistica_Administracion_de_la_cadena_de_suministro_5ta_Edicion_Ronald_H_Ballou
- [10] A. Gómez, “Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad,” p. 4, 2010, Accessed: Sep. 24, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3875599.pdf>
- [11] REPSOL, “¿Qué es la logística inversa y qué beneficios tiene? Ejemplos | Repsol.” Accessed: Jun. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/transicion-energetica/logistica-inversa/index.cshtml>
- [12] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, “HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR: MOTIVOS ECONÓMICOS PARA UNA TRANSICIÓN ACELERADA,” 2017. Accessed: Sep. 24, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.ampf.org.ar/greenstone/sites/localsite/collect/economia/index/assoc/D219.dir/hacia-una-ecomomia-circular.pdf>
- [13] SANTANDER, “Economía lineal y circular: ¿a qué se refieren cada uno de estos términos y cuáles son sus diferencias?” Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.santander.com/es/stories/economia-lineal-y-circular-a-que-se-refieren-cada-uno-de-estos-terminos-y-cuales-son-sus-diferencias>
- [14] J. Potting, Hekkert, Marco, E. Worrell, and A. Hanemaaijer, *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319314335>
- [15] J. Cramer, “How Network Governance Powers the Circular Economy Ten Guiding Principles for Building a Circular Economy, Based on Dutch Experiences,” 2020. Accessed: Sep. 24, 2023. [Online]. Available: https://assets.ctfassets.net/fqjwh0badmlx/1elraV8IIz6bCeHJVntNF0/3d1b3fda50f0bce1062ad1c043972c68/Network_governance_for_Circular_Economy_web_version.pdf
- [16] C. R. Carter and D. S. Rogers, “A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory,” *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 38, no. 5. pp. 360–387, 2008. doi: 10.1108/09600030810882816.
- [17] Pacto Mundial de las Naciones Unidas, “Sustentabilidad de la Cadena de Suministro Una Guía Práctica para la mejora continua,” 2010. [Online]. Available: www.bsr.org
- [18] T. Brown, *Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires*. 2009. Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=x7PjWyVUoVAc&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- [19] M. Albaladejo, P. Mirazo, and L. Franco, “La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente,” ONU. Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>
- [20] M. Hortal and V. Navarro, “La logística inversa: ¿qué es y para qué sirve?” Accessed: Apr. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Logistica/Articulos/50133-La-logistica-inversa-que-es-y-para-que-sirve.html>
- [21] S. Rubio, T. Bañegil, and A. Corominas, “EL SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA EN LA EMPRESA: ANÁLISIS Y APLICACIONES,” Universidad de Extremadura, Badajoz, 2003.
- [22] C. C. Peña, P. Torres, C. J. Vidal, and L. F. Marmolejo, “La logística de reversa y su relación con la gestión integral y sostenible de residuos sólidos en sectores productivos,” *Entramado*, vol. 9, no. 1, pp. 226–238, 2013, Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032013000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- [23] Á. Flórez, E. Toro, and M. Granada, “Diseño de redes de Logística inversa: Una revisión del estado del arte y aplicación práctica,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 22, no. 2, pp. 153–177, 2012, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91126903009>
- [24] A. Rentero, “La logística inversa: ¿qué es y para qué sirve?” Accessed: Jul. 06, 2022. [Online]. Available: <https://www.hiberus.com/crecemos-contigo/la-logistica-inversa-que-es-y-para-que-sirve/>
- [25] TRANSEOP, “Logística Inversa: ¿Qué es? Descubre sus ventajas.” Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.transeop.com/blog/Logistica-Inversa/311/>
- [26] IKEA, “¿Conoces las 9 ‘R’ de la Economía Circular? ~ Orígenes: El principio de la solución,” EL MUNDO. Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: <https://origenes.elmundo.es/conoces-las-9-r-de-la-economia-circular>
- [27] L. M. Naveira, “Conferencia Ambiental presencial y online: ‘Las siete “R” básicas de la Economía Circular: rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, recuperar y reciclar,”” Universidad de Burgos. Accessed: Jun. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.ubu.es/agenda/conferencia-ambiental-presencial-y-online-las-siete-r-basicas-de-la-economia-circular-redisenar-reducir-reutilizar-reparar-renovar-recuperar-y-reciclar-con-luis-marcos>
- [28] V. Castillo, D. Barrón, E. Álvarez, and G. Cortés, “Propuesta metodológica de análisis que integra la cocreación de valor y centralidad equilibrada en los Restaurantes de puebla,” 2022.
- [29] S. C. Espinoza and F. Novoa-Muñoz, “Ventajas del alfa ordinal respecto al alfa de Cronbach ilustradas con la encuesta AUDIT-OMS,” *Revista Panamericana de Salud Pública*, vol. 42, pp. 1–6, 2018, doi: 10.26633/RPSP.2018.65.
- [30] S. Dominguez, “PROPUESTA PARA EL CÁLCULO DEL ALFA ORDINAL Y THETA DE ARMOR,” vol. 15, pp. 213–217, 2012.
- [31] NATIONAL GEOGRAPHIC, “La basura electrónica y su peligro para el medio ambiente.” Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/peligros-basura-electronica_13239
- [32] Ministerio de Ambiente Colombia, “Lineamientos Técnicos para el Manejo de

Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo
Territorial República de Colombia,” 2010.

- [33] Y. Maldonado, “Metales Ferrosos y No Ferrosos: Propiedades, Ejemplos, Usos.” Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://geologiaweb.com/materiales/metales-ferrosos-no-ferrosos/>
- [34] STEINERT KSS, “Separación y clasificación en todas las fracciones de chatarra electrónica.” Accessed: Apr. 14, 2023. [Online]. Available: <https://steinertglobal.com/es/reciclaje-de-metales/reciclaje-de-chatarra-electronica-raee/>
- [35] BANXICO, “Fijación del precio del carbono.” Accessed: Sep. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/carbon-pricing>
- [36] *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México, 2018.
- [37] PROFECO, “Obsolescencia programada: diseñados para morir.” Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/profeco/articulos/obsolescencia-programada-disenados-para-morir>