

**PROPUESTA DE UN PROCESO DE GESTIÓN PARA TRATAR RESIDUOS DE
APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE) EN EMPRESAS DE
TELECOMUNICACIONES EN COLOMBIA A PARTIR DEL ESTUDIO DE CASO DE LA
EMPRESA SERDÁN TELECOMUNICACIONES**

DORIS JAZMÍN LEGUIZAMON SUAREZ

**DIRECTOR:
ING. CARLOS MONTENEGRO MSC**

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES

MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACION TIC

BOGOTÁ, 2023

Juan Felipe , Samuel y Juan José esto es para ustedes

Todo lo que nos proponemos en la vida se puede hacer...

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Carlos Montenegro director de grado por su constante apoyo y asesoría en el desarrollo de este proyecto que tardo más de lo esperado debido a múltiples factores que impidieron tener un resultado en los tiempos esperados, a mis compañeros de maestría quienes estuvieron ahí respaldando la terminación y finalización de este proyecto y motivando su culminación , a la universidad docentes y equipo administrativo porque me acompañaron en este proceso de aprendizaje cada docente dejo una enseñanza en las actividades personales y profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

ACRÓNIMOS.....	iv
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
1. MARCO GENERAL DEL PROYECTO	9
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
1.1.1. Aspectos Ambientales	11
1.1.2. Aspectos Humanos.....	11
1.1.3. Aspectos legales	12
1.1.4. Pregunta de Investigación	15
1.2. JUSTIFICACIÓN	15
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4. ALCANCE	17
1.5. METODOLOGÍA.....	17
1.5.1. Tipo de investigación	18
1.5.2. Variables	18
1.5.3. Instrumentos de recolección de información	19
1.5.4. Tamaño población y muestra.....	19
1.5.5. Fases de la Investigación	20
2. RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.....	23
2.1. ESTADO DEL ARTE	23
2.1.1. Gestión de RAEE en el sector de las telecomunicaciones	23
2.1.2. Dinámica de sistemas en la gestión de RAEE	26
2.1.3. Normativa para la gestión de RAEE	27
2.1.4. Tecnología de reciclaje y disposición final de los RAEE	28
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	30
2.3. MARCO TEÓRICO.....	32
2.3.1. Cifras relevantes en materia de RAEE a nivel global	32
2.3.2. Impacto medio ambiental.....	34

2.3.3. Gestión integral de RAEE	34
2.3.4. Contribución de los datos de los RAEE a los objetivos de desarrollo sostenible	
36	
2.4. MARCO LEGAL	36
3. CONTEXTO Y CARACTERIZACIÓN EMPRESARIAL	39
3.1. Condiciones según la normativa colombiana.....	39
3.2. Empresa piloto	41
3.3. Condiciones iniciales	42
4. DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO RAEE	46
4.1. Tratamientos de residuos	48
4.1.1. Tratamiento de RRU y BBU	48
4.1.2. Tratamiento de las baterías	49
4.1.3. Tratamientos de Gabinetes Eléctricos	50
4.1.4. Tratamientos de Corazas.....	50
4.1.5. Tratamientos de Fibras, Jumpers y Cables.....	50
4.2. Técnicas, procesos y herramientas	52
4.2.1. BBU y RRU	52
4.2.2. BATERIAS.....	54
4.2.3. GABINETES	56
4.2.4. CORAZAS	56
4.2.5. FIBRAS, JUMPERS Y CABLES	58
5. EVALUACIÓN DE VIABILIDAD ECONÓMICA	62
6. MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN	68
7. CONCLUSIONES	69
8. RECOMENDACIONES	71
ANEXOS.....	73
REFERENCIAS	93
LISTADO DE FIGURAS.....	104
LISTA DE TABLA	105

ACRÓNIMOS

AEE: Aparatos eléctricos y electrónicos.

RAEE: Residuo de aparatos eléctricos y electrónicos.

REP: Responsabilidad extendida al productor.

RESUMEN

Este proyecto de grado tiene como objetivo proponer un proceso de gestión para tratar los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en empresas de telecomunicaciones en Colombia. El aumento en el uso de dispositivos electrónicos en esta industria ha generado un incremento significativo en la generación de RAEE, lo que plantea desafíos en su manejo adecuado y los impactos ambientales asociados. A través de un estudio de caso en la empresa Serdán Telecomunicaciones y la revisión de la literatura especializada, se identifican las mejores prácticas y regulaciones existentes en la gestión de RAEE. Se propone un proceso de gestión que abarca la identificación, tratamiento, almacenamiento temporal y disposición final de los residuos, incluyendo medidas de seguridad, capacitación del personal y consideraciones económicas. La implementación de este proceso no solo permite un manejo adecuado de los RAEE, sino que también contribuye a la protección del medio ambiente y ofrece beneficios económicos a las empresas del sector.

Palabras clave: *Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), gestión de residuos, telecomunicaciones, Colombia, impacto ambiental, proceso de gestión, seguridad, desarrollo sostenible.*

ABSTRACT

The objective of this degree project is to propose a management process to treat waste electrical and electronic equipment (WEEE) in telecommunications companies in Colombia. The increase in the use of electronic devices in this industry has generated a significant increase in the generation of WEEE, which poses challenges in its proper management and associated environmental impacts. Through a case study in the company Serdán Telecomunicaciones and a review of specialized literature, the best practices and existing regulations in WEEE management are identified. A management process is proposed that covers the identification, treatment, temporary storage and final disposal of waste, including safety measures, personnel training and economic considerations. The implementation of this process not only allows an adequate management of WEEE, but also contributes to the protection of the environment and offers economic benefits to the companies in the sector.

Key words: *Waste electrical and electronic equipment (WEEE), waste management, telecommunications, Colombia, environmental impact, management process, safety, sustainable development.*

INTRODUCCIÓN

En la era de la tecnología y las comunicaciones, las empresas de telecomunicaciones desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad. Sin embargo, este progreso tecnológico también ha traído consigo un desafío creciente: la gestión adecuada de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) [1]. En Colombia, como en muchos otros países, el aumento en la demanda de dispositivos electrónicos ha generado una acumulación preocupante de RAEE, con consecuencias negativas para el medio ambiente y la salud pública [2].

El propósito de este trabajo de grado es presentar una iniciativa para desarrollar un enfoque de manejo óptimo y ecológicamente equilibrado con el fin de afrontar los RAEE en empresas de telecomunicaciones en Colombia, poniendo especial énfasis en el estudio de caso de la organización Serdán Telecomunicaciones. Este documento está estructurado de manera que abarca diferentes aspectos relacionados con la problemática de los RAEE y su tratamiento adecuado.

En una primera etapa, se introduce un conjunto de conceptos teóricos que engloba la regulación ambiental en vigencia y los fundamentos esenciales en la administración de desechos, ofreciendo el trasfondo esencial para apreciar la relevancia de una gestión apropiada de los RAEE. Posteriormente, se explica con minuciosidad la metodología empleada en la concepción del sistema de administración, involucrando el análisis exhaustivo de los desechos generados por la entidad y el diseño de procedimientos de tratamiento idóneos.

Adicionalmente, se efectúa un examen de la viabilidad económica de la propuesta, evaluando tanto los costos como los beneficios asociados con la ejecución del sistema de manejo de RAEE en Serdán Telecomunicaciones. Igualmente, se resalta la relevancia de la colaboración y el compromiso tanto de la empresa como de su equipo, con el fin de asegurar el logro y la durabilidad del sistema sugerido.

Como resultado de este proyecto, se desarrolla un manual que se erigirá como una guía concreta para la implementación del sistema de administración de RAEE en la entidad Serdán Telecomunicaciones. Dicha guía proporcionará instrucciones detalladas relativas a

la identificación, clasificación, resguardo temporal, tratamiento y disposición definitiva de los RAEE.

Mediante este documento, se busca presentar una solución íntegra y perdurable para la gestión de desechos electrónicos, alentando tanto la protección del entorno como la salud de los trabajadores, y asimismo asegurando la conformidad con las normativas actuales referentes a la gestión de desechos. Se anticipa que la aplicación de este sistema de administración eficiente y concienzudo contribuirá a reducir los efectos adversos de los RAEE, incentivando una evolución tecnológica más consciente y sustentable en el ámbito de las telecomunicaciones en Colombia.

1. MARCO GENERAL DEL PROYECTO

En el siguiente apartado se presentan las bases del proyecto de investigación planteado, la misión de este primer apartado es contextualizar al lector con respecto al problema que se quiere solucionar, su situación actual, el alcance del proyecto, así como también los objetivos que orientarán la evolución del proyecto, además de la metodología que se planea utilizar para solucionarlos.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los aparatos, tarjetas y dispositivos eléctricos y electrónicos que han sido descartados por sus propietarios, sin intención de reutilización se clasifican como e-waste o Equipos Eléctricos y Electrónicos en Desecho (WEEE por sus siglas en inglés), conocidos como RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) en español. La composición de estos elementos varía según el producto, pudiendo contener materiales tóxicos y otros que pueden ser recuperados [3].

Según García & Ceraso [4], para el 2019 se generaron 56 millones de toneladas de RAEE, los mismos autores pronostican que para el 2030 la generación de RAEE habrá aumentado en un 56%, además que la vida útil de los AEE ha caído con el paso de los años, en 1992 el promedio de vida útil era de 4,5 años, para el 2005 este valor había caído a 2 años [5]. En otras palabras, tanto el incremento en el consumo como la reducción en la vida útil contribuyen al aumento en la producción de RAEE. Estos datos reflejan un crecimiento acelerado en la acumulación de estos residuos sólidos. El problema radica en la falta de estrategias de gestión adecuadas para su tratamiento [6], situación que se debe a la presencia de elementos peligrosos como cadmio, plomo, mercurio, bifenilos, compuestos bromados y otros similares en su composición [5].

Sumado a lo previamente expuesto, los RAEE conllevan un peligro para el entorno natural. Por ejemplo, cuando son incinerados de manera inapropiada, pueden generar considerables emisiones ambientales, propiciando la aparición de compuestos tóxicos como las dioxinas y los furanos. De igual manera, su disposición en vertederos convencionales sin tratamiento adecuado puede ocasionar una marcada degradación medioambiental debido al proceso de lixiviación [7].

Paralelamente, la existencia de componentes perjudiciales implica riesgos para la salud de quienes se dedican al reciclaje no industrial de estos desechos. A nivel global, diversos estudios han confirmado la detección de niveles elevados de estos compuestos en adultos que trabajan en esta área, así como en mujeres embarazadas y niños expuestos. Asimismo, hay un aumento en la investigación que vincula estas exposiciones con cambios en la estructura genética y la función celular, además de efectos adversos en la salud que abarcan alteraciones en los sistemas inmunológico, cardiovascular, gastrointestinal y endocrino. También se han observado complicaciones durante la etapa perinatal, como partos prematuros, restricción del crecimiento intrauterino, disminución de la capacidad pulmonar en neonatos y alteraciones neuroconductuales en la niñez [8].

Estos problemas son precisamente los que se buscan evitar en la empresa Serdán, que es el enfoque central de análisis en esta investigación. La expansión reciente de las líneas de negocio de la empresa ha llevado a una ampliación de sus servicios, incluyendo el ingreso al sector de las telecomunicaciones. Los procesos que actualmente se ejecutan en esta nueva línea de negocio generan cantidades significativas de RAEE. En este contexto, los clientes de la empresa exigen garantías y soportes que cumplan con las pautas establecidas por las casas matrices en el extranjero, incluyendo aquellas relacionadas con la gestión de RAEE. En la actualidad, Serdán carece de procesos específicos y rigurosos para abordar esta situación, delegando la tarea de disposición de RAEE a terceros que no cuentan con la documentación requerida.

En síntesis, Serdán Telecomunicaciones demanda un diseño de gestión destinado al tratamiento de los RAEE originados en su línea de telecomunicaciones. Esto se debe, en primer lugar, a la ausencia actual de procedimientos de esta índole en la empresa; en segundo lugar, a la solicitud de sus clientes como requisito para mantener su contrato de servicios; y en tercer lugar, a la obligación de la empresa como parte de su responsabilidad social corporativa de minimizar el impacto sobre todos los participantes directos e indirectos involucrados en la prestación de sus servicios, incluyendo el entorno natural, los individuos que desempeñan labores y la sociedad en su conjunto.

1.1.1. Aspectos Ambientales

El período de vida útil de los desechos provenientes de dispositivos eléctricos y electrónicos en desuso (RAEE) oscila entre cuatro y cinco años, pero su relación con el entorno es problemática debido a la existencia de elementos perjudiciales en sus diversos elementos. Estos incluyen bifenilos policlorados, éteres bifenílicos, sustancias tóxicas y elementos de gran peso. La incineración inadecuada de estos desechos resulta en emisiones sustanciales que propician la creación de compuestos perjudiciales como dioxinas y furanos. Además, estos dispositivos contienen materiales nocivos como plomo, azufre y níquel, cuya eliminación en vertederos tradicionales puede causar un daño ambiental significativo. La liberación de estas sustancias peligrosas al entorno aumenta el riesgo de contaminación en suelos, aire y agua. Es crucial resaltar que, si estos residuos se depositan en vertederos sin tratamiento, pueden generar consecuencias ambientales debido al proceso de lixiviación, que involucra la disolución de componentes a través de líquidos como ácido acético o sulfúrico [9].

1.1.2. Aspectos Humanos

Los desechos originados de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y los procesos de reciclaje no industriales, que a veces incluyen la quema de materiales, resultan en la exposición a una mezcla de compuestos altamente tóxicos como el plomo, mercurio, cadmio, cromo, bifenilos policlorados (PCBs), sustancias bromadas e hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de contaminantes persistentes como las dioxinas y los furanos, entre otros. La gestión inadecuada de estos compuestos no solo da lugar a la contaminación ambiental, sino que también presenta un riesgo para la salud humana. A nivel global, diversas investigaciones han documentado niveles elevados de estos compuestos en adultos que trabajan en esta área, mujeres embarazadas y niños expuestos. Al mismo tiempo, la cantidad de estudios que vinculan estas exposiciones con alteraciones en la genética y función celular, así como con efectos negativos en la salud que involucran el sistema inmunológico, cardiovascular, gastrointestinal y endocrino, además de complicaciones en la etapa perinatal como partos prematuros y restricción del crecimiento intrauterino, ha aumentado. Estos efectos abarcan la disminución de la función pulmonar en neonatos y cambios en el comportamiento neurocognitivo durante la infancia. Además del riesgo tóxico, el reciclaje informal de RAEE puede ocasionar lesiones al desmontar

componentes de dispositivos o quemaduras al usar soluciones ácidas para separar materiales de valor comercial. En el caso de la obtención de elementos como oro y cobre en el sector no regulado, e incluso ilegal, esta actividad se convierte en una oportunidad para grupos vulnerables, incluyendo niños (buscados por su destreza manual) y mujeres embarazadas [8]. En la Figura 1 se resumen los efectos que ocasionan los metales pesados en el cuerpo humano.

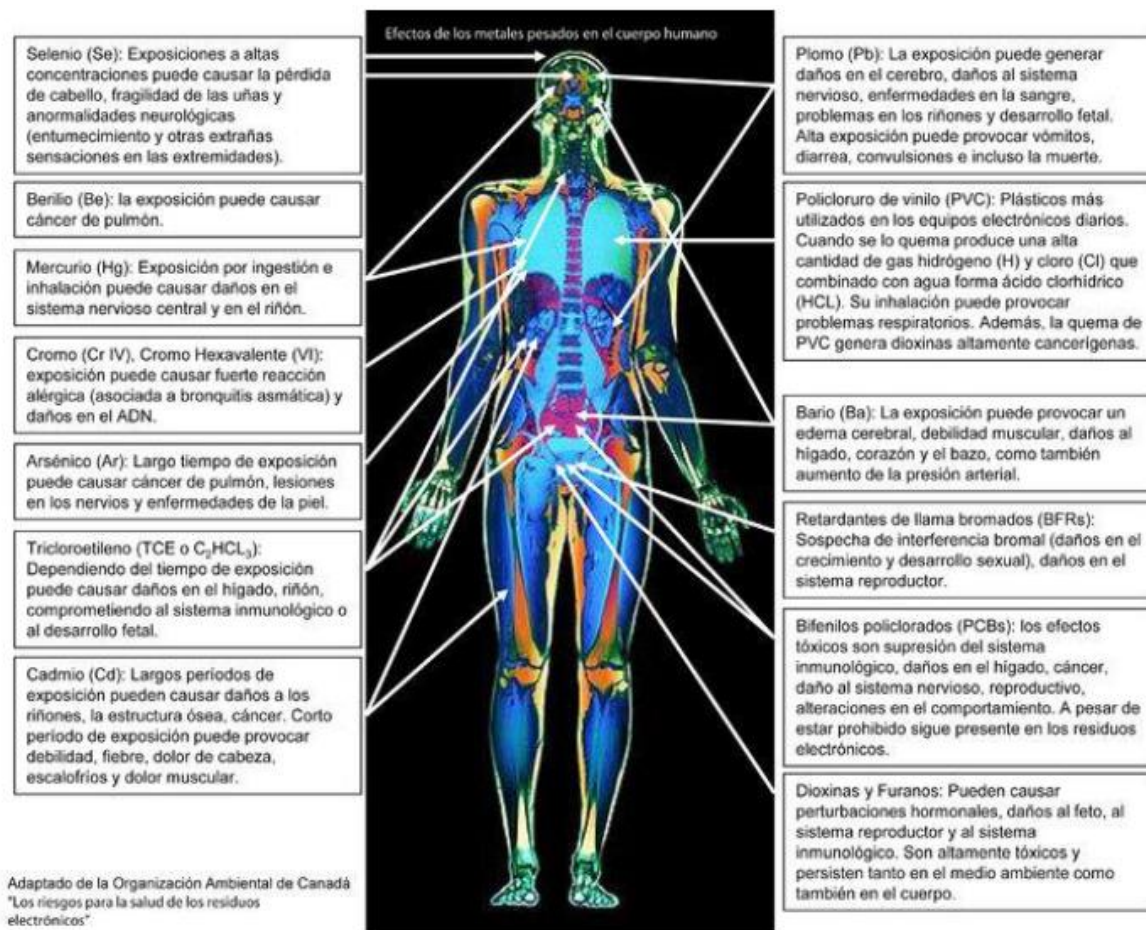


Figura 1. Efecto de los metales pesados en el cuerpo humano.

Fuente: [8]

1.1.3. Aspectos legales

Partiendo de la premisa de que a pesar de contar con normatividad sobre el manejo y la gestión de RAEES ésta se define como deficiente e inadecuada, teniendo en cuenta:

- Los impactos en la salud de la población y la degradación del medio ambiente siguen presentes.
- La responsabilidad extendida del productor (REP) exhibe signos de declive.
- La eficacia de los sistemas de recolección y manejo de los RAEE (postconsumo) actuales es evidente en su falta.
- Las prácticas inadecuadas de recuperación y valorización persisten.
- La esfera informal de recolección y valorización mantiene su vigencia.

Basándonos en la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), en la Figura 2 se representan los efectos que se generan a partir de la problemática RAEE, en donde se evidencian dos ejes fundamentales los cuales son, la disposición inadecuada y el mercado informal que existe alrededor del manejo de este tipo de residuos, generando finalmente afectaciones a la salud pública y contaminación ambiental.

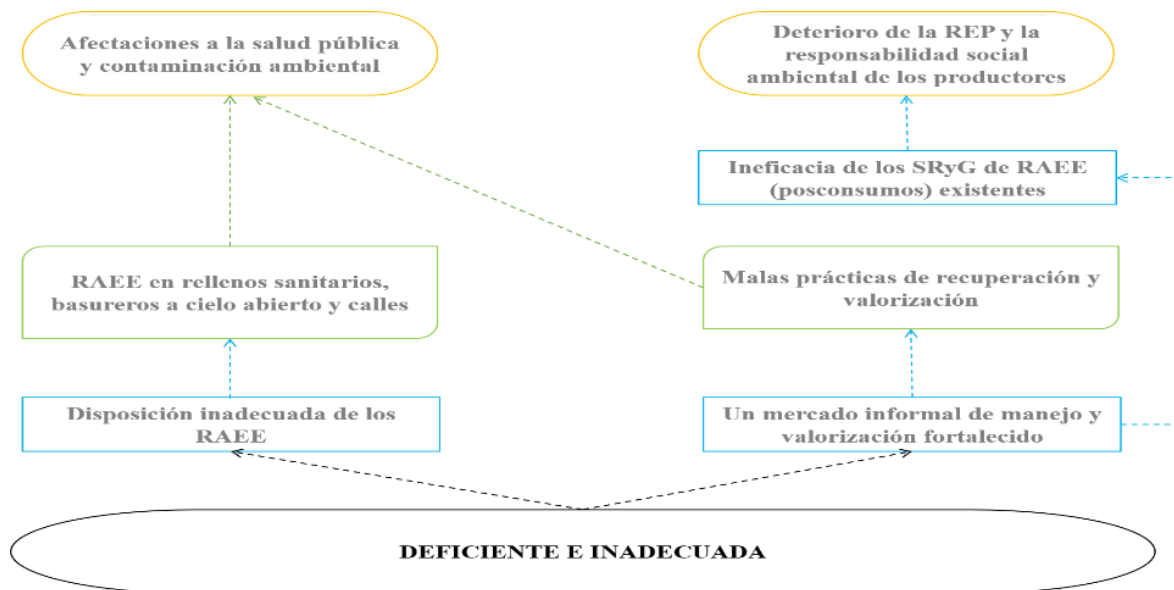


Figura 2. Efectos de la problemática RAEE

Fuente: Elaboración propia a partir de [10]

Por otra parte en la Figura 3 se presentan las causas que ocasionan los efectos presentados en la Figura 2, dentro de las cuales se destaca el alto incumplimiento de los productores obligados a la REP y al implementar SRyG de RAEE.

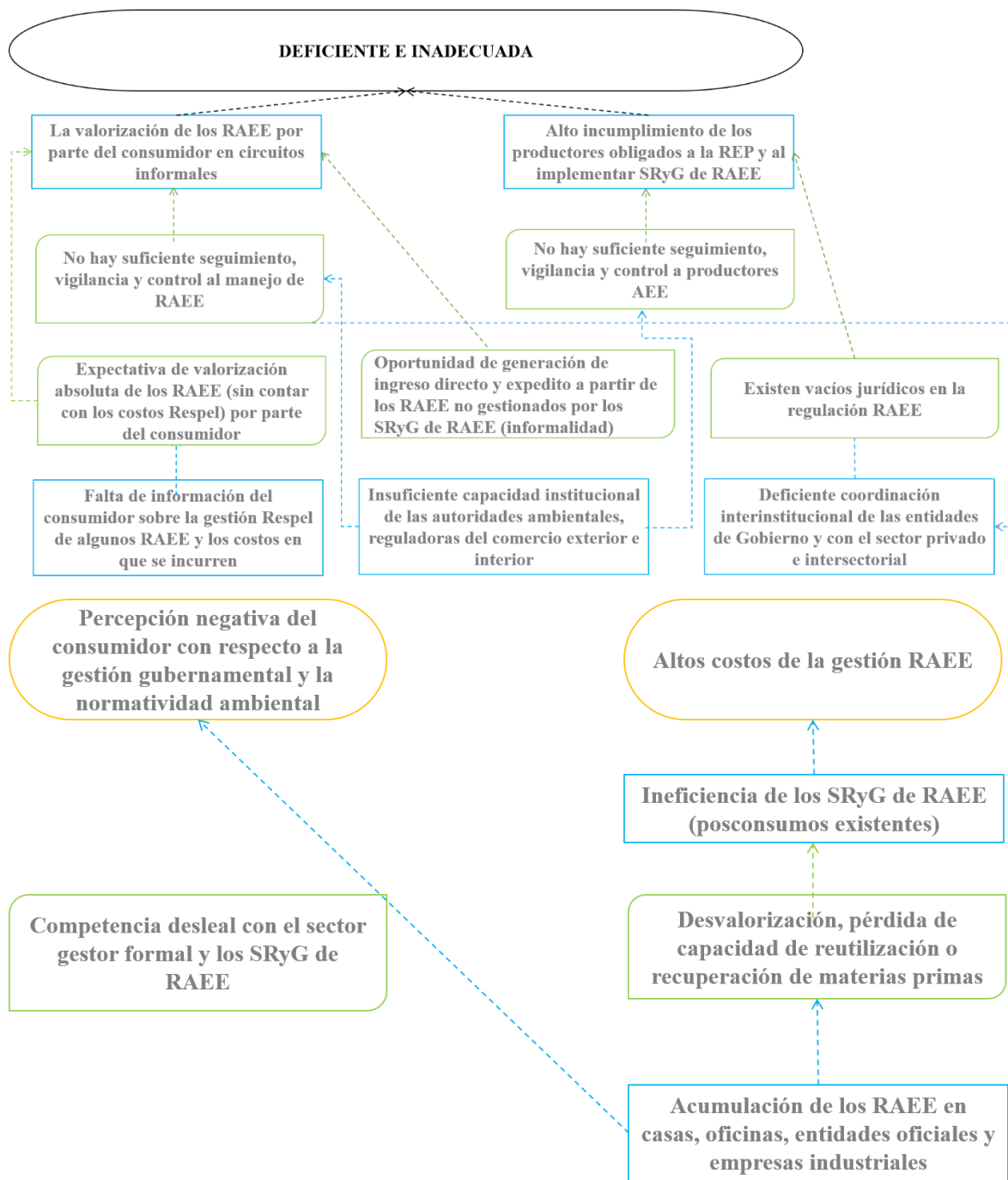


Figura 3. Causas de la problemática RAEE

Fuente: Elaboración propia a partir de [10]

De igual manera en la Figura 4 se presentan los problemas más importantes a destacar de la gestión de los RAEE en Colombia, dentro de los cuales se encuentra la falta de un programa integral de educación ambiental nacional de consumo sostenible y responsable

el cual deberá educar al consumidor sobre sus derechos y deberes frente al consumo de AEE y la gestión de los RAEE.

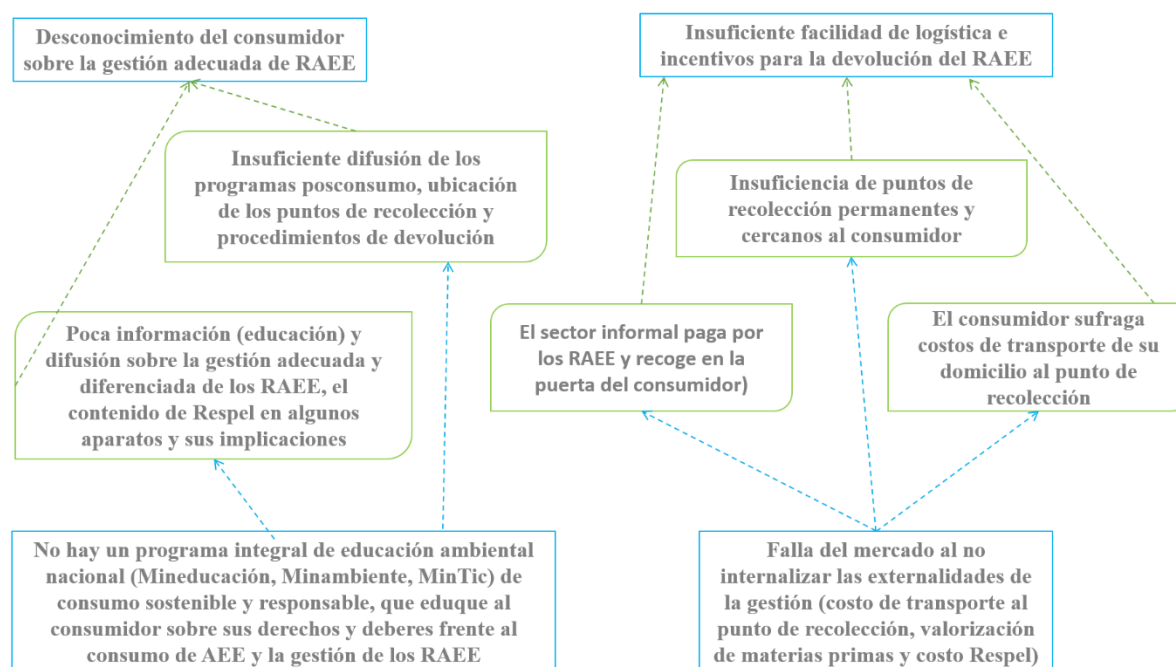


Figura 4. Gestión de los RAEE en Colombia

Fuente: Elaboración propia a partir de [10]

1.1.4. Pregunta de Investigación

Basado en el problema presentado, surge la pregunta problema, la cual deberá ser respondida con el desarrollo de este proyecto: ¿Cuáles son los procesos que deberían diseñarse e implementarse para abordar directa o indirectamente las problemáticas subyacentes relacionados con los factores humano, ambiental y legislativo y cumplir con las normativas vigentes?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La velocidad con la que se realizan innovaciones tecnológicas cada día crece más, esto repercute en que los AEE se vuelvan obsoletos en menos tiempo, afectando de manera directa el aumento de la producción de RAEE, un residuo sólido que, como se demostró en el título anterior, no cuenta con los debidos procesos para su correcta disposición final o su reúso (en el caso de la mayoría de los componentes), a raíz de este problema se genera

contaminación ambiental y riesgo en la salud humana, generando así grandes externalidades negativas visualizadas en un costo social, donde la sociedad sufre las consecuencias de las acciones de las empresas [11].

Además de esto, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) establece que, los fabricantes de productos que se convertirán eventualmente en RAEE deben asumir la responsabilidad y los costos asociados con la manejo, reciclaje y disposición final de dichos productos [12], esto demuestra la gran importancia de este proyecto para Serdán, ya que asumir la responsabilidad de la recolección y disposición adecuada de los propios RAEE y aquellos de sus clientes primarios es también el cumplimiento de los contratos con los clientes que exigen ciertas garantías, que de no cumplirse podrían generar multas o aplicación de pólizas efectivas de cumplimiento además de una mala calificación como proveedores de servicios.

Es por eso que, definir un manual de manejo de RAEE obedece a la necesidad de dar cumplimiento a la normatividad ambiental, social y empresarial. Es un trabajo conjunto de sinergia de varios actores que promueven el reúso de este tipo de residuos, disminuye la extracción de materias primas vírgenes y escasas, promueve oportunidades laborales, innovaciones a nivel tecnologías y oportunidades de nuevas líneas de negocio. Desde estas perspectivas, todas las partes involucradas se benefician al fomentar el adecuado manejo y la gestión de los desechos de dispositivos eléctricos y electrónicos. Además, se generan efectos positivos en el entorno al disminuir la producción de materiales contaminantes y se mitigan los riesgos de enfermedades en la población debido a la inapropiada disposición de dichos desechos.

Debido a lo mencionado, este proyecto adquiere gran relevancia al presentar una propuesta para el tratamiento de este tipo de residuos, especialmente para empresas del sector de las telecomunicaciones, creando así un documento referente para el sector de las telecomunicaciones y una guía que puede ser adaptada para otras industrias, con respecto al manejo de los RAEE.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Proponer un proceso de manejo, reciclaje y disposición final de los RAEE (Residuos aparatos eléctricos y electrónicos) para una empresa del sector telecomunicaciones con el fin de dar cumplimiento a la normativa actual, por medio de la metodología Dinámica de Sistemas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las condiciones iniciales y el contexto de un tipo de empresas que pueda servir como piloto para el desarrollo de la propuesta.
- Diseñar un proceso de tratamiento RAEE para la empresa Serdán Telecomunicaciones que cumpla con la reglamentación exigida por la ley colombiana en el contexto ambiental.
- Establecer la viabilidad económica de la propuesta, usando la técnica llamada dinámica de sistemas, con el fin de sustentar el impacto en las finanzas de la empresa.
- Establecer un manual de la propuesta, que pueda implementarse en empresas similares.

1.4. ALCANCE

Al final de este trabajo de grado se espera tener la propuesta de un proceso de manejo, reutilización y eliminación definitiva de los RAEE, basados en la empresa SERDAN línea de telecomunicaciones, aplicando la metodología dinámica de sistemas a través de un software especializado, dando conclusiones de si es viable o no económicamente de acuerdo con el proceso propuesto.

1.5. METODOLOGÍA

El apartado que se presenta a continuación contiene la información detallada acerca de cómo se realizó este proyecto de investigación, se incluye el tipo de investigación y Las variables identificadas, las fuentes de datos, los métodos y dispositivos utilizados para

adquirir información, junto con la población de interés y la muestra, se encuentran detallados, al igual que las etapas necesarias para alcanzar los propósitos establecidos.

1.5.1. Tipo de investigación

Existen varios criterios para establecer la clasificación de las investigaciones científicas, para este caso, se consideró el propósito como aspecto esencial para identificar el tipo de investigación. Es por eso que este proyecto se enmarcará dentro del tipo de investigación proyectiva o de proyecto factible, esto se debe a que persigue diagnosticar una realidad y en función de la situación actual, diseñar un plan de acción que permita solucionar el problema planteado, que es, el tratamiento de los RAEE generados en la empresa Serdán.

Adicionalmente el enfoque que poseerá va directamente relacionado con el tipo mixto, el cual comprende la necesidad de poder incluir análisis cuantitativo y cualitativo de forma estructurada, plasmando que este análisis pueda referir a diferentes orígenes de la información [13].

1.5.2. Variables

En la Tabla 1 se evidencia todas las variables propuestas para la aplicación de la metodología expuesta.

Tabla 1. Variables establecidas para el desarrollo del proyecto

PROCESO	ENTRADA	SALIDAS	VARIABLES DIRECTAS	VARIABLES INDIRECTAS
DESARROLLO DE ACTIVIDADES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SERVICIOS MÓVILES EN TELECOMUNICACIÓN	AEE	RAEE	Cantidad	Daño, robo o pérdida
			Peso	Presupuesto para gestión de residuos por proyecto
			Tipo de residuos	Gestores autorizados para el manejo de cada tipo de residuo

PROCESO	ENTRADA	SALIDAS	VARIABLES DIRECTAS	VARIABLES INDIRECTAS
			Destino	Plan posconsumo del productor
			Costo disposición	Condiciones climáticas, condiciones de acceso
			Vida útil AEE	Condiciones de reúso, costos asociados
			Fabricante / Comercializador- Gestor	Falta y/o incumplimientos de los gestores
			Tratamiento o Gestión	Daño o pérdidas
			Desarrollo tecnológico	Nueva tecnología que reemplace el AEE

1.5.3. Instrumentos de recolección de información

Tanto los métodos como los dispositivos elegidos para recopilar información deben ser congruentes con los propósitos del análisis y con la estructura general de la investigación. Como primera técnica para la recopilación de información se recurrió al análisis documental de fuentes bibliográficas o fuentes secundarias. En relación al diseño de campo, se empleó como técnica para recolección de datos la entrevista con especialistas, constituyendo ésta la fuente primaria de información, quienes suministraron información sobre las características de la zona, las viviendas y el sistema en funcionamiento.

1.5.4. Tamaño población y muestra

La población considerada para el desarrollo de este proyecto es finita y está constituida por los empleados que trabajan en la línea de telecomunicaciones de Serdán. Por otra parte, la muestra a considerar para el desarrollo de este proyecto será del mismo tamaño de la

población, debido a que es necesario considerar a todos los involucrados con el proceso de generación de RAEE dentro de la línea de telecomunicaciones de la empresa.

1.5.5. Fases de la Investigación

El desarrollo de los objetivos planteados se llevará a cabo mediante el planteamiento de las siguientes actividades o fases de la investigación.

- **Fase 1. Identificación de las condiciones de la empresa:** Todas las condiciones serán caracterizadas de la empresa Serdán, además para esta caracterización se tendrá en cuenta la disposición de tecnología que actualmente tiene la empresa para darle manejo a los RAEE que producen. A partir de esta caracterización, otras empresas que actualmente se encuentran en la misma posición podrían beneficiarse del método presentado en este trabajo.

Dentro de las condiciones que deben caracterizarse se encuentran: las cantidades de desechos, la frecuencia con que estos se producen, las fuentes que los generan y las características que hacen que Serdán sea considerada como una empresa de telecomunicaciones, ya que pertenecer a este tipo es lo que permite que se use a Serdán con una empresa piloto para desarrollar un plan de gestión de RAEE.

- **Fase 2. Diseño del Proceso:** En primer lugar, es esencial comprender las regulaciones actuales que supervisan la gestión de este tipo de desecho sólido, dado que en la mayoría de las ocasiones, los mandatos o disposiciones establecidas a nivel nacional presentan una metodología estándar, que podría ser utilizado como guía para la creación del manual de gestión que requieren las empresas de telecomunicaciones, además de esto, esas normas también limitan las opciones disponibles, ya que enmarcan los posibles tratamientos que según la ley se pueden utilizar.

Seguido de esto, se debe realizar una revisión bibliográfica en donde se establezcan los procesos vigentes que existen para el tipo de RAEE que se genera en la empresa, el cual fue identificado en la fase 1 del proyecto, además se debe garantizar que los procesos seleccionados cumplen con la normativa nacional.

Luego de esto, se procede a la selección dentro de los procesos, basado en la tecnología disponible en la empresa, así como también el costo de implementación de cada proceso y su fácil aplicación, estos factores serán valorados y las opciones

que presenten una mejor calificación serán los seleccionados para tratar cada RAEE que se produce en la empresa Serdán.

- **Fase 3. Estudio de la Viabilidad de la propuesta:** Para que el diseño adquiriera una validez económica se debe usar una simulación por dinámica de sistemas que usa las características estructurales del sistema identificadas en la fase 1 y el diseño de la fase 2. Se busca encontrar un equilibrio entre las capacidades de una hipotética empresa que produce RAEE (en el primer caso será Serdán) y los límites en cuanto a cantidades de desechos, personal, maquinaria o recursos económicos que puedan ser alcanzados con el proceso. Si se establece este equilibrio y todas las demás condiciones iniciales se mantienen se puede cumplir con la afectación positiva de las finanzas de la empresa y se aporta al bienestar de la comunidad y a la preservación de la situación ambiental.

Dentro de las estrategias valiosas para configurar redes de logística inversa, se destaca la aplicabilidad de la dinámica de sistemas. Esta disciplina es arraigada en el pensamiento sistémico y establece un paradigma de pensamiento con un conjunto particular de convenciones y lenguaje. Se han desarrollado herramientas informáticas que respaldan el proceso de construcción y simulación mediante dinámica de sistemas. La representación y evolución del modelado y simulación en dinámica de sistemas se basa en la imagen o concepto mental que construimos. Este modelo es dinámico, evolucionando a medida que interactuamos con el fenómeno, incorporando nuevas percepciones y experiencias, o al reinterpretar vivencias y concepciones desde distintas perspectivas [14].

La primordial virtud de la dinámica de sistemas radica en su habilidad para generar una evaluación más precisa del comportamiento del sistema, al integrar elementos cualitativos como el juicio de expertos en el proceso de modelado. Esto conlleva a un uso más exhaustivo de la información disponible [15].

- **Fase 4. Redacción del manual y entrega del procedimiento:** Finalmente, la documentación apropiada de los procesos anteriores debe producir un manual de implementación para que otras empresas puedan beneficiarse de un programa de recolección similar al desarrollado para Serdán. El manual debería cubrir aquellos hallazgos de los dos primeros objetivos, pero dejar de lado la viabilidad económica que es obtenida a través de la simulación que debe realizarse teniendo en cuenta las características específicas y el entorno de cada empresa.

En la En la Figura 5, se muestra el esquema de procedimiento que dirige las etapas.

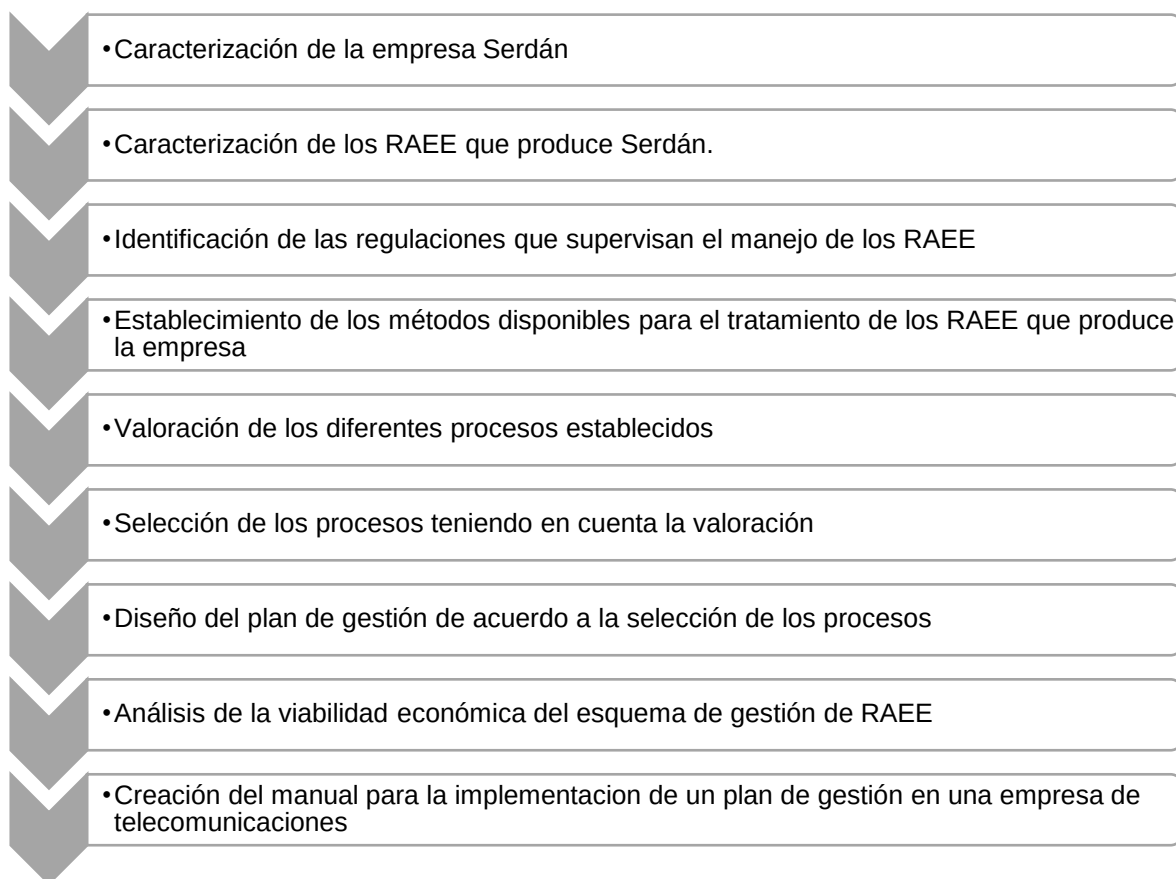


Figura 5. Diagrama de proceso de la ejecución del proyecto

Con el desarrollo de estas fases se espera alcanzar con éxito el desarrollo del objetivo general planteado al inicio de este documento.

2. RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

2.1. ESTADO DEL ARTE

La correcta administración de los Desechos de Equipos Eléctricos y Electrónicos (DEEE) ha aumentado su relevancia a nivel mundial debido a su influencia desfavorable sobre el entorno ecológico y la salud de las personas [16]. Las compañías dedicadas a las telecomunicaciones representan una de las principales fuentes generadoras de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), debido a la breve vida útil y a la rápida desactualización de sus productos y equipos [17]. Este fenómeno ha motivado la implementación de diversas iniciativas y programas orientados a gestionar de manera adecuada estos residuos, incluyendo estrategias de reciclaje y disposición responsable [18].

En este estado del arte, se examinan algunas de las investigaciones más relevantes relacionadas con la gestión de RAEE en el ámbito de las telecomunicaciones, centrando la atención en las prácticas y soluciones empleadas en países seleccionados. Estos países han sido elegidos debido a su liderazgo en la implementación de estrategias efectivas y actualizadas en la gestión de RAEE. Aunque muchos otros países como Estados Unidos o Canadá también han implementado medidas significativas en este ámbito, se ha decidido enfocar en aquellos que han demostrado ser más representativos en términos de enfoques innovadores y sostenibles en la gestión de RAEE.

2.1.1. Gestión de RAEE en el sector de las telecomunicaciones

En Malasia, la compañía de comunicaciones Maxis Communications ha implementado un esquema de recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), estableciendo puntos de recogida en sus tiendas y desarrollando un sistema de logística inversa para la recopilación de RAEE directamente desde los hogares de sus clientes. Esta iniciativa se lleva a cabo en colaboración con una empresa local de reciclaje, lo que asegura una gestión apropiada y segura de los RAEE [19].

En México, la empresa de telecomunicaciones Telmex ha desarrollado un programa de recolección de RAEE en colaboración con la empresa de reciclaje Electrónica Verde. El

plan comprende la colocación de recipientes de recogida en las instalaciones de Telmex, así como la recopilación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) directamente desde los domicilios de los usuarios. Además, Telmex ha establecido un esquema de administración de RAEE que incluye la clasificación y el desmontaje de los equipos para su posterior reciclaje [20].

En Brasil, la empresa de telecomunicaciones Vivo ha implementado un programa de recolección de RAEE en colaboración con la empresa de reciclaje Green Eletron. Este programa consiste en la instalación de puntos de recolección en las tiendas de Vivo y la recolección de RAEE desde la vivienda de los usuarios. Además, La empresa Vivo ha introducido un esquema de administración de RAEE que abarca la categorización y desmontaje de los dispositivos con el fin de facilitar su ulterior proceso de reciclaje [21].

En Corea del Sur, la empresa de telecomunicaciones KT ha desarrollado un sistema de recolección de RAEE que incluye la instalación de contenedores de recolección en sus tiendas y la recolección de RAEE directamente en los hogares de los clientes. KT ha establecido un sistema de gestión de RAEE que incluye la evaluación y la reparación de los equipos para su reutilización y la separación y reciclaje de los componentes [22].

En España, la empresa de telecomunicaciones Telefónica ha desarrollado un programa de recolección de RAEE en colaboración con la empresa de reciclaje Ecoasimelec. Este programa consiste en la instalación de puntos de recolección en las tiendas de Telefónica y la recolección de RAEE directamente en los hogares de los clientes. Además, Telefónica ha desarrollado un mecanismo de administración de RAEE que incluye la clasificación y el desmontaje de los equipos para su posterior reciclaje. Telefónica también promueve la reutilización de los dispositivos móviles y ofrece servicios de reparación y renovación para extender su vida útil. Este proyecto ha sido notable por su influencia positiva en el entorno natural y en la práctica de la economía circular [23].

Además, en una investigación realizada por Al-Salem et al., se evaluó la gestión de los RAEE en los países árabes y se identificó que el principal desafío es la falta de conciencia pública y el bajo nivel de adopción de prácticas sostenibles. Asimismo, se destacó la importancia de contar con una legislación adecuada y una infraestructura de gestión de residuos electrónicos para abordar estos desafíos [24].

En una línea similar, Kinyua y su equipo llevaron a cabo una investigación sobre la gestión de RAEE en Kenia, llegando a la conclusión de que la carencia de comprensión y la ausencia de aplicación de políticas y regulaciones adecuadas son los obstáculos primordiales para lograr una administración eficaz de los RAEE en la nación. En su estudio, también identificaron que el reciclaje y la reutilización de los RAEE podrían reducir significativamente los impactos ambientales negativos asociados con estos residuos [25].

En Colombia, varios estudios han abordado la gestión de los RAEE en diferentes sectores. Por ejemplo, una investigación realizada por Rojas-Valencia et al. analizó la gestión de los RAEE en el sector de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en Colombia, identificando que la falta de infraestructura de reciclaje y la baja participación de los consumidores son los principales desafíos en la gestión de estos residuos [26]. En una investigación adicional, Díaz y colaboradores llevaron a cabo una evaluación de la administración de RAEE en el ámbito hospitalario colombiano, llegando a la conclusión de que existe una urgente necesidad de mejorar los procedimientos de reciclaje y manejo de estos desechos dentro de este sector [27].

En un contexto similar, Olaya-Rodríguez y colaboradores realizaron un análisis acerca de la administración de los RAEE en Bogotá, Colombia. Sus conclusiones resaltaron que la carencia de regulaciones y de una infraestructura de reciclaje sólida representan los obstáculos principales para la gestión eficiente de los RAEE en la ciudad. En su estudio, también se destacó la importancia de involucrar a todos los actores relevantes en la gestión de los RAEE, abarcando a los usuarios, las empresas, el gobierno y los recicladores informales [28].

Además, Ali et al. sugieren que la implementación de la gestión de RAEE no solo tiene beneficios ambientales, sino también económicos [29]. Asimismo, Agamuthu et al. señalan que, la falta de implementación adecuada de la gestión de RAEE puede llevar a graves impactos ambientales y sociales [30]. Por lo tanto, la implementación efectiva de la gestión de RAEE es una cuestión importante que debe ser abordada por las empresas.

En cuanto a la gestión de RAEE en el sector de las telecomunicaciones, se han llevado a cabo varios estudios. Por ejemplo, Rama et al. proponen un modelo de gestión de RAEE para empresas de telecomunicaciones que incluye etapas como la identificación de los

RAEE generados, la clasificación de los mismos y su posterior tratamiento [31]. Además, Liu et al. analizan el impacto de la gestión de RAEE en la cadena de suministro de las empresas de telecomunicaciones en China y sugieren la necesidad de una mayor cooperación entre los distintos participantes de la cadena [32].

2.1.2. Dinámica de sistemas en la gestión de RAEE

En el estudio de la gestión de RAEE, se pueden aplicar diversas metodologías para abordar los desafíos asociados a este problema. Algunas de las metodologías existentes incluyen la Optimización, Análisis de Ciclo de Vida, Análisis de Redes Sociales y Dinámica de Sistemas, en la Tabla 2 se presentan las características y ventajas de cada uno.

Tabla 2. Metodologías para toma de decisiones

METODOLOGÍAS	CARACTERÍSTICAS - VENTAJAS
OPTIMIZACIÓN	Se centra en encontrar soluciones óptimas para maximizar o minimizar una función objetivo, generalmente relacionada con la eficiencia o el rendimiento.
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	Se enfoca en evaluar las repercusiones ambientales a lo largo de la totalidad del ciclo de existencia de un producto o proceso, con el objetivo de tomar decisiones más sostenibles.
ANÁLISIS DE REDES SOCIALES	Analiza las relaciones sociales y la estructura de las redes para comprender la difusión de información y la influencia en un sistema social.
DINÁMICA DE SISTEMAS	Representa y realiza simulaciones de la dinámica de sistemas complejos a lo largo de un período temporal, considerando las interacciones entre las variables y la retroalimentación.

En resumen, estas metodologías abordan diferentes aspectos y perspectivas en la toma de decisiones, como la eficiencia, la sostenibilidad, las relaciones sociales y el comportamiento de sistemas complejos. Su aplicación varía según el contexto y los objetivos específicos de cada situación.

La Dinámica de Sistemas se ha seleccionado como la metodología principal en este proyecto debido a su capacidad para representar la complejidad y las conexiones entre los

diferentes elementos de un sistema, lo que permite analizar el comportamiento y las relaciones entre las variables que influyen en la generación y gestión de los RAEE.

Diferentes investigaciones han incorporado la Dinámica de Sistemas para afrontar diversas problemáticas vinculadas a la administración de desechos. A modo de ejemplo, López-Vargas et al. crearon un modelo basado en la Dinámica de Sistemas para examinar la gestión de residuos sólidos urbanos en Colombia, con el propósito de identificar las variables y conexiones fundamentales que impactan en la generación y manejo de estos desechos [33]. En otro análisis, Barraza et al. aplicaron la metodología de la Dinámica de Sistemas para investigar la gestión de residuos peligrosos en México, concluyendo que esta metodología resulta beneficiosa al determinar las variables esenciales y las interrelaciones que influyen en la gestión de estos desechos [34]. Por último, De Oliveira et al. recurrieron a la metodología de la Dinámica de Sistemas para elaborar un modelo de gestión de residuos sólidos urbanos en una ciudad de Brasil, con el propósito de evaluar distintos escenarios y políticas de administración de desechos [35].

La elección de la Dinámica de Sistemas como metodología en este proyecto se basa en las siguientes razones:

- Su aptitud para modelar la complejidad y las interrelaciones entre los diversos elementos de un sistema.
- La capacidad para analizar y contrastar variados escenarios y enfoques de gestión de residuos.
- La competencia para identificar las variables y conexiones primordiales que impactan en la producción y manejo de los RAEE.

2.1.3. Normativa para la gestión de RAEE

A nivel mundial, diversas regulaciones tienen como objetivo supervisar la administración de RAEE en los países que las integran. Una de las más significativas es el Convenio de Basilea, un acuerdo internacional que pretende regular los traslados transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación final de manera ambientalmente apropiada. Dentro del campo de los RAEE, el enfoque del Convenio de Basilea está orientado hacia la

reducción del impacto medioambiental de los residuos electrónicos, alentando una gestión sostenible y consciente de los mismos [36].

De igual manera, la Unión Europea ha instituido una serie de regulaciones para la administración de los RAEE a través de la Directiva 2012/19/UE, la cual establece las metas y bases para la gestión de estos desechos en los países miembros. Dicha Directiva fija, entre otras cuestiones, los propósitos de recolección y reciclaje de los RAEE, así como la responsabilidad en la gestión final de los productos electrónicos por parte de los fabricantes al término de su vida útil [37].

En relación a la legislación a nivel nacional, cada nación dispone de su propia normativa para el manejo de los RAEE. Por ejemplo, en Colombia, la Resolución 1115 de 2017 establece los lineamientos generales para la gestión ambiental de los RAEE en el país. Esta resolución define los requerimientos relativos a la recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición definitiva de los RAEE, al mismo tiempo que delinean las responsabilidades de los diversos participantes en el proceso [38]. También se encuentra la Resolución 1411 de 2017, que establece los lineamientos para la gestión ambientalmente adecuada de los RAEE en el país. Además, se encuentra la Resolución 1411 de 2017, que establece los parámetros para una gestión ambientalmente adecuada de los RAEE en el territorio. Dicha resolución especifica, entre otros aspectos, las obligaciones de los distintos actores en el tratamiento de RAEE, los procedimientos para la recogida y transporte de estos desechos, y la obligación de los productores y fabricantes de equipos electrónicos de instaurar sistemas de recogida y gestión de sus productos al término de su vida útil [39].

En otros países como México, la administración de los RAEE se encuentra regulada por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la cual establece los cimientos y directrices para la gestión total de los residuos, incluyendo los RAEE. Entre otros aspectos, la ley fija los objetivos y metas para la recolección y reciclaje de los RAEE, así como las responsabilidades de los productores y generadores de estos residuos [40].

2.1.4. Tecnología de reciclaje y disposición final de los RAEE

A nivel internacional, se cuentan con variadas tecnologías y enfoques para la administración de los RAEE. En el ámbito del reciclaje, se destaca el empleo frecuente de la técnica de

fragmentación mecánica, la cual posibilita la recuperación de elementos valiosos como metales, plásticos y vidrios contenidos en los desechos electrónicos [41]. Otra estrategia ampliamente empleada es el método de pirólisis, que implica la descomposición térmica de los residuos electrónicos en un entorno exento de oxígeno, permitiendo así la recuperación de metales y la generación de combustibles y gases útiles [42].

Otras tecnologías de reciclaje y disposición final de los RAEE también han sido propuestas. Un análisis llevado a cabo por Kumar y Holuszko evaluó la viabilidad de la hidrólisis ácida como tecnología para la recuperación de metales valiosos presentes en los RAEE [43]. Los investigadores determinaron que la hidrólisis ácida resultó eficaz en la extracción de metales como el cobre, oro y plata de los RAEE, lo cual ilustra su potencial como una opción sustentable y económicamente viable para la reutilización de estos materiales. Además, la tecnología de pirólisis ha sido utilizada en varias investigaciones para el tratamiento de los RAEE [44]. Por ejemplo, Chen et al. evaluaron la aplicación del pirólisis para el tratamiento de los RAEE y encontraron que esta tecnología fue capaz de recuperar metales y producir combustibles líquidos y sólidos [45].

A nivel nacional, en Colombia se han implementado diversas tecnologías para la gestión de RAEE, entre las que se destacan la fragmentación mecánica y la clasificación manual de los residuos electrónicos [46]. Sin embargo, debido a la falta de infraestructura y tecnología adecuadas, gran parte de los RAEE recolectados en el país son exportados a otros países para su tratamiento y reciclaje [47].

En Bogotá, se han implementado diferentes iniciativas para la gestión de RAEE, entre las que se encuentran la creación de puntos de recolección en centros comerciales y puntos de venta de electrodomésticos, y la implementación de programas de recolección puerta a puerta en algunas zonas de la ciudad [48]. Además, se han realizado esfuerzos para fomentar la cultura del reciclaje de RAEE entre los ciudadanos, a través de campañas de sensibilización y educación ambiental [49].

Se han propuesto diversas tecnologías y métodos para el tratamiento de los RAEE, en consonancia con las regulaciones actuales. Sin embargo, la elección adecuada de la tecnología y el proceso depende de múltiples variables, como la composición de los RAEE, los costos asociados a los procedimientos y la existencia de infraestructuras disponibles,

entre otros aspectos. Por lo tanto, se hace imprescindible un enfoque metódico en la concepción e implementación de un sistema de gestión de RAEE, que tome en consideración todas estas variables y permita a las organizaciones cumplir con las regulaciones en vigor al tiempo que minimizan su repercusión medioambiental y social.

Además de los factores mencionados anteriormente, también hay consideraciones económicas que pueden influir en el diseño y la implementación de procesos de gestión de RAEE. Por ejemplo, un estudio realizado por González-Torre et al. señaló que la instalación de sistemas de administración ambiental en empresas de tamaño reducido y mediano puede ser costosa, pero que una planificación cuidadosa y una inversión inicial bien dirigida pueden llevar a ahorros a largo plazo [50]. De manera similar, un estudio realizado por Ertörer et al. mostró que, aunque el reciclaje de RAEE puede tener costos elevados, la recuperación de materiales valiosos puede generar ingresos significativos y mejorar la sostenibilidad financiera de una empresa [51].

En resumen, el manejo adecuado de los RAEE es crucial para mitigar los impactos ambientales y de salud asociados con su disposición inadecuada, así como para cumplir con las normativas vigentes en materia ambiental. La metodología Dinámica de Sistemas puede ser una herramienta útil para diseñar y optimizar procesos de gestión de RAEE en empresas de telecomunicaciones. Sin embargo, los desafíos y las consideraciones económicas y sociales asociadas con la implementación de dichos procesos también deben ser abordados cuidadosamente.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Para la clara comprensión del contenido de este proyecto de investigación es necesario conocer varios conceptos clave, que serán utilizados durante el desarrollo del documento.

Aparatos Electrónicos y Eléctricos (AEE): se considera como aparato eléctrico y electrónico a cualquier equipo que demande suministro de corriente eléctrica o campo electromagnético para su operación, diseñado para operar con una tensión nominal que no exceda los 1000 V en corriente alterna y 1500 V en corriente continua. Esto incluye también los dispositivos necesarios para generar, transmitir y medir estas corrientes y campos. En la actualidad, se emplean extensamente diversos dispositivos de esta naturaleza,

abarcando desde electrodomésticos de gran tamaño como refrigeradores, lavadoras y televisores, hasta consolas de videojuegos, herramientas eléctricas, y dispositivos de uso cotidiano como teléfonos móviles, smartphones y tabletas. Todos estos constituyen ejemplos de aparatos eléctricos y electrónicos [52].

Residuos de Aparatos Electrónicos y Eléctricos: según el Gobierno de España: “son todos los aparatos eléctricos y electrónicos que pasan a ser residuos de acuerdo con la definición que consta en el artículo 3.a) de la Ley 22/2011, de 28 de julio. Esta definición comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en que se desecha” [53]. En otras palabras, son todos los AEE que acaban su vida útil.

Clasificación de los AEE y los RAEE: los dispositivos eléctricos y electrónicos están conformados por una diversidad de productos, y con fines estadísticos, se categorizan en función de características similares como su uso, composición de materiales, peso promedio y atributos al final de su vida útil. De acuerdo con las directrices para la recopilación de datos y la elaboración de indicadores en estadísticas de RAEE, estos aparatos se dividen en 54 categorías, denominadas UNUKEY. Estas 54 categorías se encuentran agrupadas en seis amplias clasificaciones que se relacionan íntimamente con sus particularidades de manejo de residuos [11]. Estas categorías se presentan a continuación:

1. Dispositivos de control de temperatura
2. Pantallas y monitores
3. Fuentes de luz (lámparas)
4. Equipos de gran tamaño
5. Equipos de pequeño tamaño
6. Equipos informáticos y de telecomunicaciones de pequeño tamaño

Responsabilidad Extendida del Productor (REP): es un fundamento de política medioambiental que persigue minimizar el efecto ecológico de un artículo, en este contexto se traduce en que el fabricante de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) asuma la responsabilidad integral de todo el ciclo vital de su producto, con énfasis particular en la fase posterior al uso, abarcando la recolección, revalorización y eliminación definitiva [22].

Gestión integral de residuos RAEE: engloba todas las medidas normativas, funcionales, económicas, organizativas, formativas e interdependientes que se relacionan con la organización, supervisión y revisión del manejo integral de los RAEE, abarcando desde su origen hasta su reutilización y eliminación definitiva [54].

Reciclaje de AEE: “facilita la recuperación de metales y/o materiales raros, utilizados como materia prima en la producción de AEE, cuya extracción es muy contaminante” [55].

Reutilización de AEE: “reduce significativamente la presión sobre los recursos creada por la producción de nuevos AEE, muchas veces acompañada de reacondicionamiento o mantenimiento de los equipos, que por obsolescencia o dañados han sido liberados” [56].

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. Cifras relevantes en materia de RAEE a nivel global

El incremento en la cantidad de desechos electrónicos se deriva principalmente del aumento en las tasas de consumo de dispositivos eléctricos y electrónicos (AEE), la brevedad de los ciclos de vida de dichos dispositivos y la limitada disponibilidad de opciones de reparación. Durante el año 2019, Asia fue responsable de la mayor producción de desechos electrónicos (24.9 millones de toneladas), seguida por América (13.1 millones de toneladas) y Europa (12 millones de toneladas), mientras que África y Oceanía contribuyeron con 2.9 millones de toneladas y 0.7 millones de toneladas, respectivamente. En cuanto al promedio per cápita, Europa se posiciona en el primer puesto a nivel global con una generación de 16.2 kg por persona. Oceanía se ubicó en el segundo lugar (16.1 kg per cápita), seguida por América (13.3 kg per cápita), mientras que Asia y África presentaron únicamente 5.6 kg y 2.5 kg per cápita, respectivamente [11].

En la Figura 6 se evidencia el crecimiento en toneladas de la generación de RAEE por año a nivel global, además del crecimiento per cápita, y basado en los datos reales se hace una estimación de la producción para los próximos años. Para el 2019 la cantidad global de desechos electrónicos fue de 53.6 Tm, parte de estos RAEE fueron: pantallas y monitores 6,7 Tm, pequeños equipos informáticos y de telecomunicaciones representaron 4,7 Tm y lámparas 0.9 Tm [11].

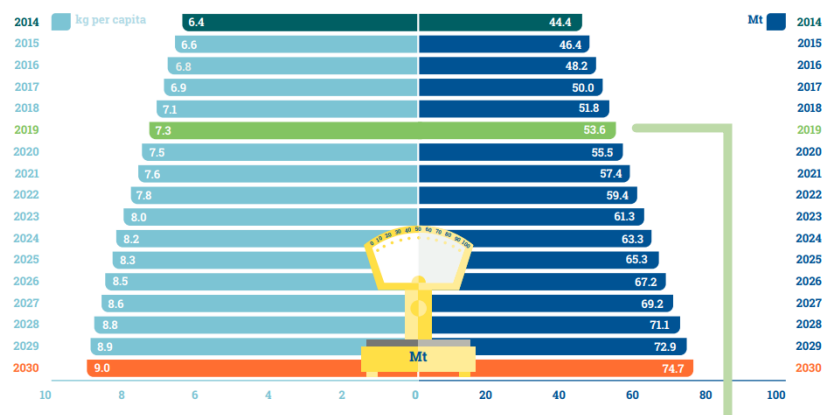


Figura 6. Generación de RAEE por año a nivel global

Fuente: [11]

En otro enfoque, en la Figura 7 se exhiben los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) producidos en comparación con los RAEE debidamente registrados, recolectados y reciclados. A nivel mundial, existe un total de 50 toneladas de mercurio y 71,000 toneladas de plásticos con retardantes de llama (BFR, por sus siglas en inglés) que carecen de documentación en las estadísticas anuales de desechos electrónicos, y que en gran medida se liberan al medio ambiente, afectando significativamente la salud de los trabajadores expuestos. La deficiente administración de los RAEE contribuye al fenómeno del calentamiento global [11].

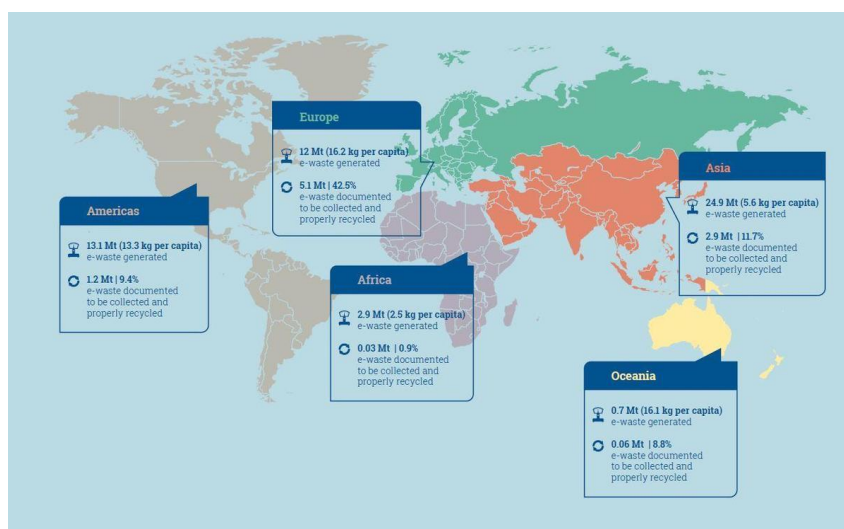


Figura 7. Desechos electrónicos generados vs. Desechos electrónicos documentados para ser recogidos y reciclados adecuadamente por continente

Fuente: [11]

2.3.2. Impacto medio ambiental

La considerable cantidad de materiales o elementos constituyentes de los AEE "podrían parecer pequeñas, pero cuando se acumulan en cantidades significativas en zonas sin infraestructura adecuada y se disponen inapropiadamente en vertederos, se desencadenan impactos ambientales debido a la presencia de metales pesados" [57]. En ciertos lugares de desmantelamiento de RAEE, estos elementos son descargados en el suelo sin la debida cobertura, lo que evita la contaminación superficial, la incineración o el calentamiento de sustancias que emiten gases tóxicos y nocivos para la salud de los trabajadores y el entorno.

La composición de los RAEE genera inquietud tanto en gobiernos como en defensores del medio ambiente, ya que una manipulación, destrucción, transporte o almacenamiento inadecuados pueden ocasionar impactos sustanciales, con serias consecuencias para el medio ambiente y una disminución directa en la calidad de vida de la población. Al evaluar y manejar los RAEE, es crucial tener en cuenta la presencia de metales pesados, como el plomo, litio y mercurio, que, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "pueden ocasionar daños a la salud humana" [58].

En este contexto, se sostiene que "la exposición a niveles elevados de plomo en el corto plazo puede provocar vómitos, diarrea, convulsiones, coma o incluso la muerte". Además, se señala que "el mercurio es un metal pesado tóxico que se acumula en el cuerpo, causando daños al cerebro y al hígado cuando se ingiere o inhala" [59], resaltando solo algunas de las múltiples consecuencias adversas que estos compuestos pueden tener en la salud de las personas.

2.3.3. Gestión integral de RAEE

La gestión holística de desechos se refiere al conjunto integral de actividades y estrategias destinadas a controlar y reducir la cantidad de desechos producidos por una sociedad o entidad comercial. Esto engloba la prevención, reutilización, reciclaje y disposición final adecuada de los desechos, con la meta de minimizar su impacto ambiental y maximizar su valor económico [60].

Por otro lado, la administración integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se refiere al conjunto comprensivo de acciones y tácticas orientadas a gestionar de manera responsable y apropiada los desechos generados por los equipos eléctricos y electrónicos durante todas las etapas de su ciclo de vida, desde su fabricación hasta su disposición definitiva. Esta administración es imperativa debido a la significativa cantidad de desechos electrónicos generados a nivel global cada año, y a los potenciales impactos medioambientales y sociales que pueden derivar si no son manejados adecuadamente [61].

La gestión íntegra de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) puede abarcar varios enfoques y teorías. Uno de ellos es el principio de las "3R" (reducir, reutilizar y reciclar), que busca minimizar la producción de desechos RAEE y maximizar su valor económico y medioambiental a través de la prevención, reutilización y reciclaje [62].

Adicionalmente, el concepto de economía circular puede ser aplicado a la gestión global de RAEE, con el propósito de reducir la cantidad de desechos y fomentar la reutilización y el reciclaje de los materiales. La economía circular se fundamenta en la noción de que los residuos generados en un proceso productivo pueden ser aprovechados como recursos en otro proceso, fomentando así la reducción del impacto medioambiental y la optimización de los recursos [63].

También es posible aplicar el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que establece que los fabricantes tienen la responsabilidad de gestionar tanto sus productos como sus desechos, incluso después de que hayan sido vendidos [64]. Esto implica que los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos deben considerar la gestión de desechos como una parte intrínseca del ciclo de vida de sus productos y adoptar medidas para garantizar su adecuada administración.

Otra teoría relevante es la gestión medioambiental, que promueve la implementación de sistemas y prácticas para reducir el impacto medioambiental de la producción y consumo de bienes y servicios. En el contexto de la gestión íntegra de RAEE, esto implica la adopción de medidas para reducir la cantidad de desechos generados, garantizar su adecuada gestión y fomentar el reciclaje y reutilización de materiales [65].

2.3.4. Contribución de los datos de los RAEE a los objetivos de desarrollo sostenible

En septiembre de 2015, la Organización de las Naciones Unidas, en colaboración con todos sus estados miembros, presentó una agenda para el año 2030, estableciendo 17 metas para el desarrollo sostenible con la finalidad de eliminar la pobreza, proteger el entorno y asegurar prosperidad para todos en un período de 15 años. El aumento continuo de los desechos electrónicos, el manejo inadecuado e inseguro, y su disposición mediante la incineración o su depósito en vertederos plantean desafíos significativos en términos de medio ambiente, salud humana y la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible delineados por la ONU [66].

La administración de los desechos electrónicos guarda una relación estrecha con los objetivos de desarrollo sostenible, como se observa en los siguientes aspectos: el tercer objetivo que aboga por la salud y bienestar, el sexto objetivo que promueve agua limpia y saneamiento, el octavo objetivo relacionado con trabajo digno y crecimiento económico, y el decimocuarto objetivo que se enfoca en la vida submarina [66].

2.4. MARCO LEGAL

En este apartado se menciona toda la normatividad legal que tiene relación con el tema que se desarrolla en este proyecto, en la Tabla 3 se hace un resumen de cada artículo, norma, decreto o ley nacional que tiene alguna relación con el desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Marco Legal

NORMA	DESCRIPCIÓN
LEY 2811 DE 1974	Código nacional de recursos renovables y de protección al medio ambiente. Esta ley establece que el ambiente es un bien común y tanto el estado como los particulares tienen la responsabilidad de participar en su conservación y manejo. También destaca que los recursos naturales renovables deben ser preservados y manejados en beneficio público y social.
DECRETO 4741 DE 2005	Regulación parcial de la prevención y manejo de residuos peligrosos generados en el contexto de la gestión integral. Su objetivo es prevenir la generación de residuos peligrosos y regular el manejo adecuado de dichos residuos para proteger la salud humana y el medio ambiente.

NORMA	DESCRIPCIÓN
RESOLUCIÓN 1512 DE 2010	Sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de computadoras y periféricos: Esta resolución establece que los productores de computadoras y periféricos deben implementar sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos generados por estos productos. El propósito es prevenir y controlar el deterioro ambiental.
LEY 1672 DEL 2013	Establece los lineamientos para la política pública de gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) generados en el país.
DECRETO 1079 DE 2015	Normativas de transporte de mercancías peligrosas emitidas por el Ministerio de Transporte. Establece requisitos técnicos y de seguridad para el manejo y transporte de mercancías peligrosas por carretera en todo el territorio nacional, con el objetivo de reducir riesgos y proteger tanto la seguridad como el medio ambiente.
DECRETO 284 DE 2018	Tiene como finalidad regular la gestión integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) con el fin de prevenir y minimizar los impactos negativos en el entorno ambiental.

Además de toda la normativa mencionada en la Tabla 3, el Ministerio de Ambiente formuló en 2017 una política que, aunque no es una ley de la república, establece una “hoja de ruta” con horizonte definido para el estado las empresas y la “sociedad colombiana” en general con el fin de afrontar un manejo inadecuado y los potenciales efectos sobre la salud y el medio ambiente [67].

La hoja de ruta de este ministerio, como política nacional, contempla unos objetivos y un plan de acción asociado para conseguirlos: se pretende “promover la gestión integral” de los RAEE para contribuir desde este aspecto con el “desarrollo sostenible”. Más específicamente se pretende disminuir la cantidad de RAEE a través del consumo responsable. También se buscan nuevas formas de trabajo a través del aprovechamiento de los materiales reutilizables y finalmente “la plena integración” de los actores involucrados en nuevas actividades que complementen la política formulada.

El plan de acción se fundamenta en cuatro “enfoques” guiados por (1) el consumo responsable (extensión de la vida útil y “eco-diseño”), (2) la implementación de “mecanismos” de recolección, aunque solo se mencionan los centros de acopio, (3) la

mejora de la infraestructura a nivel nacional para el aprovechamiento de materiales reutilizables en los RAEE y (4) la formación de colaboraciones con empresas para trabajar en las tres estrategias previas. En resumen, la política no presenta un modelo específico para la recolección y gestión de los RAEE y, en su esencia, consiste en un llamado a la conciencia de los productores y consumidores para minimizar el impacto en la sociedad y el medio ambiente. También otorga total libertad a las empresas responsables para implementar sus propios enfoques en la recolección, aprovechamiento de materiales reutilizables y disposición final.

3. CONTEXTO Y CARACTERIZACIÓN EMPRESARIAL

Para elaborar de manera eficaz la propuesta, resulta crucial contextualizar y fundamentar la elección de una empresa específica como entidad piloto. En este contexto, se ha decidido que una empresa del sector de las telecomunicaciones sea la idónea para llevar a cabo la implementación del enfoque propuesto en cuanto a la gestión, reciclaje y disposición adecuada de los RAEE.

3.1. Condiciones según la normativa colombiana.

En Colombia, la ley 1672 de 2013 establece los requisitos que deben ser cumplidos por las empresas involucradas en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Algunas de estas disposiciones son las siguientes:

- Obtención de permisos ambientales: Las empresas encargadas de tratar RAEE deben asegurarse de obtener la aprobación ambiental necesaria de la entidad competente en temas ambientales.
- Cumplimiento de estándares técnicos y de seguridad: Es esencial que estas empresas tengan la infraestructura adecuada, junto con equipos y herramientas apropiadas para llevar a cabo el tratamiento de RAEE de manera segura y efectiva, cumpliendo con las directrices técnicas y de seguridad prescritas.
- Establecimiento de trazabilidad: Deben implementar sistemas de seguimiento que permitan rastrear el origen y destino de los RAEE, además de documentar las acciones realizadas durante todas las etapas del tratamiento.
- Observancia de regulaciones medioambientales: El tratamiento de RAEE por estas empresas debe llevarse a cabo de acuerdo con las leyes medioambientales vigentes, minimizando los impactos ecológicos y protegiendo la salud humana.
- Formación del personal: Se requiere que las empresas cuenten con personal debidamente instruido y capacitado en la gestión y tratamiento de RAEE, así como en la operación de los equipos y herramientas necesarios.
- Tratamiento integral: Las empresas deben llevar a cabo un proceso completo de tratamiento de RAEE, involucrando todas las etapas del proceso (desde el almacenamiento, transporte, clasificación, desmontaje, reciclaje hasta la disposición

final). Esto asegura la máxima recuperación de materiales y la minimización de la generación de residuos.

La empresa debe proporcionar el tratamiento adecuado para cada tipo de residuo, según lo establecido en la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos [10] . Los detalles sobre el tratamiento específico para cada residuo se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tratamiento de RAEE

TRATAMIENTO DE RAEE PARA EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES	
DESMONTAJE	Este proceso implica la separación de las diferentes partes y componentes, como los soportes, los cables, los conectores, las baterías, los ventiladores, las fibras ópticas, los circuitos electrónicos, entre otros.
CLASIFICACIÓN	Esta clasificación permite identificar los materiales que pueden ser reciclados y separarlos de los que deben ser eliminados de manera segura.
RECUPERACIÓN DE MATERIALES	Los materiales reciclables se someten a procesos de recuperación, como la trituración y el fundido, para recuperar los metales y otros materiales valiosos.
ELIMINACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS	Los residuos peligrosos son eliminados de manera segura y controlada en instalaciones especializadas que cumplen con las normas ambientales y de seguridad.
DISPOSICIÓN FINAL	Los residuos que no son reciclables y no contienen sustancias peligrosas son enviados a lugares autorizados para su disposición final.

La Tabla 4 presenta de manera simplificada el procedimiento para el tratamiento de residuos provenientes de dispositivos de telecomunicaciones, comúnmente referidos como RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos).

El primer paso es el desmontaje, que implica separar las diferentes partes y componentes del equipo, como cables, conectores, baterías, circuitos electrónicos, entre otros.

Luego, se realiza la clasificación de los materiales, con el objetivo de identificar aquellos que pueden ser reciclados y separarlos de los que deben ser eliminados de manera segura.

Los materiales reciclables se someten a procesos de recuperación, como la trituración y el fundido, para extraer los metales y otros materiales valiosos presentes en ellos.

Los residuos peligrosos, aquellos que contienen sustancias que pueden ser nocivas para el medio ambiente o la salud, se eliminan de manera segura y controlada en instalaciones especializadas que cumplen con las normas ambientales y de seguridad.

Por último, los residuos que no son reciclables y no contienen sustancias peligrosas son enviados a lugares autorizados para su disposición final de manera adecuada.

Este procedimiento de manejo asegura una gestión completa de los RAEE, fomentando la recuperación de materiales preciosos, la reducción de la huella ambiental y la conformidad con las regulaciones actuales relacionadas con los desechos.

3.2. Empresa piloto

Serdán Telecomunicaciones es una reconocida empresa en el diagnóstico y mantenimiento de sistemas de telecomunicaciones, brindando servicios de alta calidad gracias a sus recursos técnicos y humanos altamente capacitados. Su vasta experiencia en el sector le permite manejar una amplia variedad de AEE de telecomunicaciones, lo que la convierte en la elección idónea para ser seleccionada como empresa piloto en el proceso de manejo, reciclaje y disposición final de los RAEE. Además, cuenta con una infraestructura adecuada y apta para llevar a cabo el tratamiento de los RAEE, lo cual es un factor crucial por considerar. En la Tabla 5 está caracterizada la información de la empresa piloto

Tabla 5. Contexto de empresa piloto

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
OBJETIVO DE LA PROPUESTA	El procedimiento de gestión, reciclaje y eliminación definitiva de los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) destinado a una compañía perteneciente al ámbito de las telecomunicaciones.
SECTOR O INDUSTRIA	Industria de Telecomunicaciones
EMPRESA PILOTO	Serdán Telecomunicaciones

3.3. Condiciones iniciales

Después de haber identificado la empresa piloto, se deberán definir las condiciones iniciales que permitirán llevar a cabo la propuesta de manera exitosa. Esto implica realizar una evaluación detallada de la empresa sobre los RAEE que hay en ella, incluyendo el peso de cada residuo, cantidad de residuo y otros aspectos relevantes que puedan influir en el proceso de implementación. La Tabla 6 muestra los tipos de residuos que tiene la empresa.

Tabla 6. Tipos de residuos

NOMBRE	REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN
RRU		Unidad de radio remota se encarga de procesar y amplificar las señales de radio antes de enviarlas a través de las antenas hacia los dispositivos móviles.
BBU		Unidad de Banda Base se encarga del procesamiento de la señal en la red de acceso móvil, convirtiendo las señales analógicas que se reciben de los dispositivos móviles en señales digitales
BATERIAS		Proporcionan energía de respaldo para mantener los servicios de telecomunicaciones en caso de cortes de energía o interrupciones en la red.
GABINETE		Carcasa o contenedor utilizado para alojar equipos de red y telecomunicaciones, como servidores, switches, routers, amplificadores, convertidores de medios y otros componentes.
CORAZAS		Componentes utilizados para proteger y asegurar la integridad de los cables de fibra óptica.

NOMBRE	REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN
FIBRAS		Tipo de cable utilizado para transmitir información a través de pulsos de luz
JUMPER		Cable corto que se utiliza para conectar dos elementos de un sistema, generalmente en una red de transmisión de señales.
CABLE		Es un conductor que se utiliza para transmitir señales de información

La empresa lleva a cabo un proceso de modernización de los equipos instalados en las torres de telecomunicaciones, lo que implica la eliminación de los equipos antiguos y la producción de residuos electrónicos (RAEE). Con el fin de caracterizar adecuadamente estos residuos, se han tomado muestras de residuos de 10 instalaciones distintas, cuya composición se detalla en la

Tabla 7.

Tabla 7. Muestreo de los residuos

RESIDUO		MUESTRA										PROM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RRU	UND	3	2	4	3	2	5	2	2	4	3	3
	PESO [KG]	75	50	100	75	50	125	50	50	100	75	75
BBU	UND	1	2	0	3	0	1	0	1	1	1	1
	PESO [KG]	30	60	0	90	0	30	0	30	30	30	30
BATERIAS	UND	3	4	5	0	1	5	4	3	3	2	3
	PESO [KG]	150	200	250	0	50	250	200	150	150	100	150

RESIDUO		MUESTRA										PROM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GABINETE	UND	1	0	2	1	2	0	2	0	1	1	1
	PESO [KG]	100	0	200	100	200	0	200	0	100	100	100
CORAZAS	UND	5	6	7	4	4	3	5	6	4	6	5
	PESO [KG]	25	30	35	20	20	15	25	30	20	30	25
FIBRAS	UND	8	6	5	6	5	6	4	8	7	5	6
	PESO [KG]	20	15	12.5	15	12.5	15	10	20	17.5	12.5	15
JUMPER	UND	4	4	5	6	5	6	4	4	7	5	5
	PESO [KG]	9.6	9.6	12	14.4	12	14.4	9.6	9.6	16.8	12	12
CABLES	UND	95	90	15	60	80	80	90	60	60	70	70
	PESO [KG]	81.4	77.1	12.9	51.4	68.6	68.6	77.1	51.4	51.4	60	60

Dado que la empresa realiza en promedio 10 actividades de modernización por semana, podemos inferir que al mes llevarían a cabo 40 de estas actividades, lo que suma un total de 480 por año. Estos números representan una cantidad significativa de residuos generados que no están siendo gestionados correctamente. En la Tabla 8 se presentan las cantidades promedio de residuos generados por cada actividad de modernización. Actualmente, Serdán Telecomunicaciones no cuenta con un proceso establecido para la gestión y reciclaje de los residuos generados por las actividades de modernización. Esto significa que estos residuos terminan siendo desechados como basura, sin una adecuada separación ni tratamiento.

Tabla 8. Cantidad de residuos por Instalaciones promedios

RESIDUO		PROMEDIO					
		POR INSTALACIÓN		SEMANTAL		ANUAL	
NOMBRE	UND	CANT	KG	CANT	KG	CANT	KG
RRU	UND	3	75	30	750	1440	36000
BBU	UND	1	30	10	300	480	14400

RESIDUO		PROMEDIO					
NOMBRE	UND	POR INSTALACIÓN		SEMANAL		ANUAL	
		CANT	KG	CANT	KG	CANT	KG
BATERIAS	UND	3	150	30	1500	1440	72000
GABINETE	UND	1	100	10	1000	480	48000
CORAZAS	UND	5	25	50	250	2400	12000
FIBRAS	UND	6	15	60	150	2880	7200
JUMPER	UND	5	12	50	120	2400	5760
CABLE	MTS	70	60	700	600	33600	28800

Resulta significativo resaltar la relevancia de instaurar un procedimiento completo de manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), especialmente en el contexto de una empresa como Serdán Telecomunicaciones, que opera en el ámbito de las telecomunicaciones. Establecer un sistema que incluya desensamblaje, categorización, recuperación de recursos y disposición apropiada de los desechos peligrosos contribuirá a disminuir el impacto medioambiental y fomentará la reutilización y reciclaje de los materiales valiosos presentes en estos dispositivos.

La elaboración de la Tabla 8 permitió culminar con la identificación de las condiciones iniciales de la empresa piloto encargada de llevar a cabo el desarrollo de la propuesta. Esto cumple con el primer objetivo y finaliza el desarrollo exitosamente.

4. DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO RAEE

El manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) es un procedimiento de gran relevancia para garantizar una disposición adecuada de los desechos derivados de estos dispositivos electrónicos. Este proceso comprende diversas fases cuyo propósito radica en minimizar el impacto ambiental y fomentar la reutilización y el reciclaje de los materiales.

La Figura 8 presenta un esquema que propone una opción para que los usuarios realicen la correcta eliminación de sus dispositivos eléctricos y electrónicos (DE), evitando así su acumulación en hogares o establecimientos, y previniendo que terminen en vertederos sin el manejo apropiado.

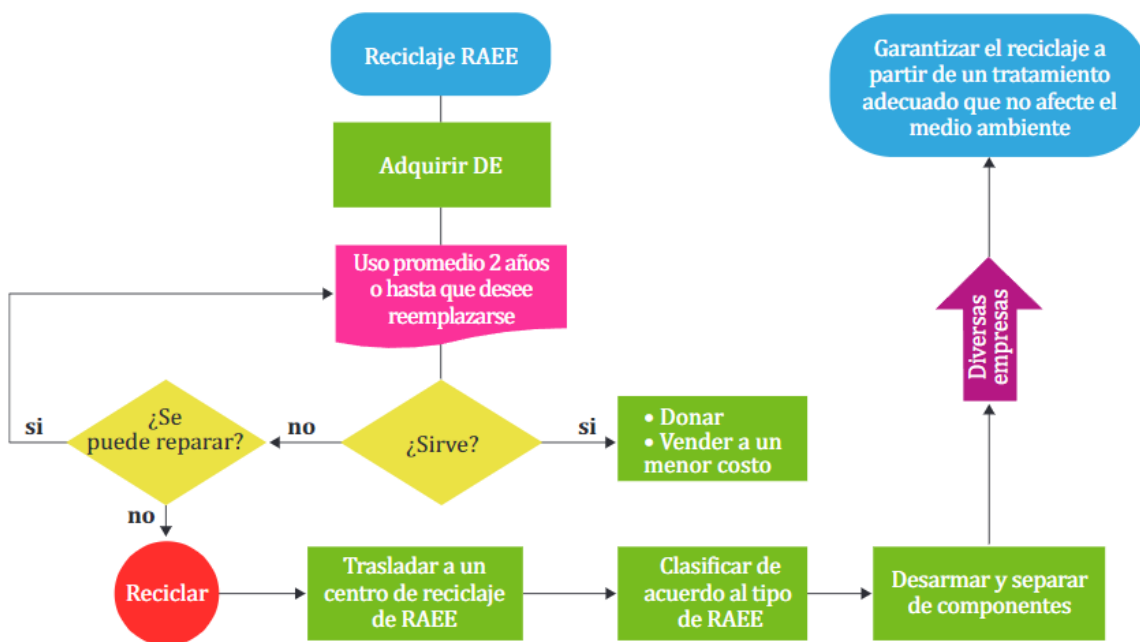


Figura 8. Diagrama de flujo de los RAEE

Fuente: [68]

La Figura 8 muestra un diagrama de flujo que propone una alternativa para que los usuarios puedan deshacerse adecuadamente de sus dispositivos eléctricos y electrónicos (DE) de manera responsable. Esta propuesta se sugiere como un proceso a implementar en Serdán

Telecomunicaciones, ya que cumple con los principios básicos y es universalmente conocido en la gestión de RAEE.

La elección de este proceso se basa en los siguientes fundamentos:

- Promueve la responsabilidad compartida: El proceso propuesto busca involucrar tanto a los usuarios como a la empresa Serdán Telecomunicaciones en la gestión adecuada de los RAEE. Esto implica que los usuarios sean conscientes de la importancia de desechar correctamente sus dispositivos y que la empresa asuma la responsabilidad de facilitarles medios para hacerlo.
- Prevención de acumulación y contaminación: El proceso propuesto evita que los dispositivos eléctricos y electrónicos se acumulen en hogares o negocios, lo cual puede dar lugar a un problema de contaminación y riesgos para la salud. Al proporcionar una forma adecuada de deshacerse de estos dispositivos, se previene la disposición inadecuada en rellenos sanitarios.
- Fomento del reciclaje y la reutilización: El diagrama de flujo propuesto incluye etapas como la recolección selectiva de los DE, su clasificación y posterior envío a instalaciones especializadas para el reciclaje y la recuperación de materiales valiosos. Esto contribuye a reducir la demanda de recursos naturales al tiempo que se promueve la reutilización de componentes y materiales en nuevos productos.
- Cumplimiento normativo: El proceso sugerido se basa en las mejores prácticas y está alineado con las normativas internacionales y nacionales relacionadas con la gestión de RAEE. Esto garantiza que Serdán Telecomunicaciones cumpla con las regulaciones vigentes y contribuya al cuidado del medio ambiente.

En síntesis, la selección de este procedimiento se justifica por su enfoque completo en la gestión de los RAEE, impulsando la corresponsabilidad, previniendo la acumulación y contaminación, impulsando la reutilización y el reciclaje, y cumpliendo con los lineamientos establecidos. Aplicarlo en Serdán Telecomunicaciones posibilitaría una adecuada administración de los desechos derivados de sus operaciones, reduciendo su impacto ambiental y apoyando la sostenibilidad.

Resulta esencial gestionar de forma apropiada los RAEE, debido a la presencia de materiales perjudiciales para la salud y el ecosistema si no se abordan correctamente. En

esta línea, el diagrama de flujo procura fomentar la adopción de un proceso para la correcta disposición final de los RAEE.

En esta dirección, se busca incentivar a los usuarios a adoptar prácticas responsables para evitar la contaminación ambiental y los riesgos para la salud. Se subraya la importancia de concienciar a la población sobre la trascendencia de una gestión adecuada de los RAEE, impulsando la cultura del reciclaje y la economía circular para alcanzar un futuro más sustentable.

Es esencial que las empresas se ajusten a los lineamientos ambientales y de seguridad para garantizar un tratamiento responsable y adecuado de los RAEE. De esta forma, se contribuye a la preservación del medio ambiente y se fomenta la economía circular, en la cual los materiales pueden ser reutilizados y reciclados en lugar de ser desechados.

4.1. Tratamientos de residuos

4.1.1. Tratamiento de RRU y BBU

Es de suma importancia considerar la correcta disposición de los dispositivos electrónicos inoperantes, como los equipos RRU y BBU, en concordancia con los lineamientos establecidos en la Ley Nacional de Residuos Sólidos. La regulación exige que estos dispositivos sean dirigidos hacia instalaciones especializadas en reciclaje electrónico o sean devueltos al fabricante. Durante el proceso de reciclaje, los desechos electrónicos son desmontados minuciosamente y sus componentes son categorizados en grupos tales como plástico, metal y baterías. Específicamente, los dispositivos electrónicos contienen 17 variedades de metales, que incluyen cobre, plata y oro.

Para reciclar el plástico contenido en estos dispositivos, se lleva a cabo su trituración y fusión, transformándolo en hilos a través de un procedimiento mecánico. Posteriormente, el plástico proveniente de los cables es enfriado y molido en pequeños gránulos, que luego se comercializan a fábricas para ser utilizados en la producción de diversos artículos [69].

En lo que concierne a los metales, solo un pequeño grupo de empresas a nivel global está calificado para efectuar la separación adecuada de metales amalgamados. Una de ellas es Umicore, con base en Bélgica, que procesa anualmente 350 mil toneladas de residuos. En

Umicore, los metales recibidos son molidos y mezclados de manera uniforme. Posteriormente, se extrae una muestra y se envía al laboratorio para identificar los metales presentes y calcular el valor que se pagará por los residuos, así como la cantidad de recursos naturales recuperados.

Para la clasificación de los metales, se realiza una separación por lotes, agrupando elementos homogéneos, como placas de circuitos. Algunos metales funcionan como imanes, como el cobre, que atrae al oro, paladio y selenio, formando una aleación. Un proceso similar se aplica al plomo, el cual atrae metales como la plata y el estaño, creando la segunda agrupación. La tercera categoría se forma a través del níquel, que atrae al platino y al rodio [69].

Finalmente, las tres aleaciones son separadas independientemente debido a sus propiedades químicas distintivas. De esta manera, los metales son recuperados en forma de nuevos elementos y pueden ser reintegrados en las mismas industrias que los utilizaron originalmente. El reciclaje de los desechos electrónicos resulta esencial para prevenir la inadecuada disposición de estos residuos y la consecuente contaminación del entorno, además de evitar la explotación de los recursos naturales [69].

En base a la información presentada, y considerando la ausencia en Colombia de empresas que ofrezcan un procedimiento adecuado para la separación de materiales de placas electrónicas como BBU y RRU, la alternativa más idónea sería un almacenamiento y reciclaje apropiado de estos residuos. Posteriormente, empresas especializadas podrían encargarse de su manipulación para la disposición final correcta.

4.1.2. Tratamiento de las baterías

Las baterías y acumuladores incorporan metales pesados, como el mercurio, cadmio y plomo, todos altamente tóxicos y potencialmente dañinos para el entorno. El depósito incontrolado de estos residuos puede ocasionar su arrastre por la lluvia hacia aguas subterráneas, ríos y océanos, contaminando ecosistemas acuáticos y afectando la cadena alimentaria [70].

Investigaciones especializadas indican que una sola pila podría contaminar hasta 600.000 litros de agua, resaltando la relevancia de la gestión adecuada de estos residuos. El proceso

de reciclaje de baterías comienza con la recolección y subsiguiente recuperación del ácido contenido en las mismas. Posteriormente, se procede a triturar las baterías, separando el plástico y fundiendo el plomo presente para transformarlo en lingote [70].

Investigaciones especializadas indican que una sola pila podría contaminar hasta 600.000 litros de agua, resaltando la relevancia de la gestión adecuada de estos residuos. El proceso de reciclaje de baterías comienza con la recolección y subsiguiente recuperación del ácido contenido en las mismas. Posteriormente, se procede a triturar las baterías, separando el plástico y fundiendo el plomo presente para transformarlo en lingotes [70].

Según lo establecido en la Resolución número 0372 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, las baterías son catalogadas como residuos peligrosos y, en consecuencia, deben someterse a un plan de gestión de devolución de productos posconsumo para su reintegración en la cadena de producción. En concordancia con las regulaciones colombianas, este tipo de residuo se encuentra sujeto exclusivamente al proceso de reciclaje.

4.1.3. Tratamientos de Gabinetes Eléctricos

Es viable que un técnico proceda a la reparación del gabinete eléctrico con el propósito de reincorporarlo a las instalaciones. Sin embargo, es crucial que estas reparaciones cumplan con las pautas establecidas por NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) o IP (Protección de Ingreso), que determinan los estándares de seguridad aplicables a los gabinetes [71]. Al realizar este proceso de reparación se puede generar un ahorro significativo, ya que no se tendría que adquirir un nuevo gabinete.

4.1.4. Tratamientos de Corazas

Las **corazas** sobrantes de la instalación están fabricadas principalmente de plástico, el cual puede someterse al proceso de reciclaje. Este proceso implica triturar el plástico y **venderlo** para su reutilización en otros procesos productivos.

4.1.5. Tratamientos de Fibras, Jumpers y Cables

Las fibras, jumpers y cables se pueden tratar mediante procesos de separación del cable del núcleo, para poder vender o reciclar lo que hay en el núcleo y triturar el plástico.

El plástico triturado puede comercializarse para su transformación en pellets. Estos pellets de plástico son pequeños cilindros comprimidos de plástico que se emplean mayormente en la industria de la fabricación de plásticos para crear diversos objetos, como envases, tuberías, juguetes, entre otros.

La fabricación de estos pellets se basa en la conversión del plástico a partir de su forma original, como botellas, bolsas y envases. El proceso comienza con la recolección y separación de los residuos de plástico, los cuales son limpiados y triturados en partículas pequeñas. Posteriormente, estas partículas se someten a un proceso de extrusión y compresión para convertirse en cilindros compactos conocidos como pellets.

Aunque los pellets de plástico principalmente se aplican en la industria de fabricación de plásticos, también se están investigando y desarrollando nuevas aplicaciones para ellos, como en la construcción y la industria textil. Sin embargo, es esencial destacar que el uso excesivo y la mala gestión de los desechos plásticos pueden tener graves repercusiones ambientales, lo que subraya la importancia de fomentar prácticas de reducción, reutilización y reciclaje de estos materiales [72].

El núcleo de las fibras ópticas está compuesto de vidrio o sílice, y de acuerdo con la Resolución 0000835 de 2013 emitida por el Ministerio de Salud, cualquier objeto cerámico, incluyendo envases, objetos y equipo, puede ser reciclado para la producción de nuevos envases. En consecuencia, es viable reciclar el núcleo de las fibras ópticas.

El núcleo de los jumpers y cables contiene principalmente aluminio y cobre, dos materiales que son altamente valorados en la industria del reciclaje debido a su capacidad para ser reutilizados y reducir la dependencia de la extracción de materias primas. De hecho, el reciclaje de metales como el cobre y el aluminio es beneficioso tanto para la economía como para el medio ambiente.

Según un informe de la Agencia Internacional de Energía, el reciclaje de metales puede ahorrar hasta un 95% de la energía necesaria para producir nuevos metales a partir de materias primas. Además, la producción de metales reciclados también genera menos emisiones de gases de efecto invernadero que la producción de metales a partir de minerales.

Por lo tanto, el reciclaje de los materiales utilizados en los jumpers y cables, como el aluminio y el cobre, no solo ayuda a reducir el impacto ambiental, sino que también tiene un impacto positivo en la economía al reducir la dependencia de las materias primas y promover una economía circular.

Establecido el tratamiento de cada residuo se procede con las técnicas y maquinarias necesarias para el proceso de RAEE

4.2. Técnicas, procesos y herramientas

4.2.1. BBU y RRU

Es de suma importancia que los desechos electrónicos sean dirigidos hacia instalaciones especializadas en reciclaje o devueltos al fabricante del respectivo dispositivo. Para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, resulta esencial disponer de un depósito de almacenamiento apropiado y establecer un programa semanal que permita que el centro especializado recoja los desechos de forma regular.

El adecuado manejo de los desechos electrónicos desempeña un papel fundamental en la reducción de su impacto ambiental y en la prevención de la contaminación del suelo y del agua. Por lo tanto, resulta de vital importancia que tanto las compañías como los consumidores adopten medidas responsables para garantizar una gestión adecuada de estos desechos y así contribuir a la preservación del entorno. El flujo semanal de dichos desechos se representa en la Figura 9.



Figura 9. Flujo de BBU y RRU semanal

El almacenamiento corresponde con la cantidad de residuos, semanalmente llegan 1050 kg entre BBU y RRU, estos residuos son de alta densidad (menor volumen para un gran peso) por lo que los contenedores industriales de 1100 litros (Figura 10) pueden servir para su almacenamiento. Estos contenedores cumplen con la norma EN840-5 la cual aprueba

el uso de estos contenedores en exteriores, además tienen resistencia de 500 kg de peso, por lo que se necesitan mínimo 2 contenedores para el almacenamiento de las BBU y RRU.



Figura 10. Contenedor industrial 1100 L

Fuente: [73]

El número de operarios requeridos para el proceso de reciclaje de residuos electrónicos depende del flujo diario que se maneje. En promedio, diariamente se manejan 200 kg de estos residuos. Cabe destacar que las placas electrónicas tienen un peso promedio por unidad de 27 kg, por lo que se necesitan al menos dos operarios y una carretilla de carga (Figura 11) para manejar los residuos de manera segura y prevenir riesgos de lesiones y hernias por el manejo inadecuado de los pesos.

Es importante contar con el personal adecuado y las herramientas necesarias para garantizar un proceso de reciclaje seguro y efectivo, ya que esto no solo protege la salud de los trabajadores, sino que también contribuye a la eficiencia y calidad del proceso de reciclaje.



Figura 11. Carretilla Zorra De Carga 200 Kg

Fuente: [74]

Las placas electrónicas contienen componentes que pueden ocasionar heridas por cortes, lo que hace imperativo emplear dispositivos de seguridad para su resguardo y manipulación. Es esencial utilizar guantes y gafas de protección para prevenir lesiones en las manos y los ojos, respectivamente. Además, se aconseja emplear vestimenta de seguridad como botas con puntera reforzada y un traje adecuado para evitar cortes o raspaduras en la piel.

El uso de implementos de protección personal (Figura 12) reviste una importancia capital para salvaguardar la seguridad y el bienestar de los trabajadores encargados del proceso de reciclaje de desechos electrónicos. En consecuencia, resulta esencial contar con un equipo de protección personal apropiado y garantizar su empleo constante con el fin de prevenir lesiones y accidentes.



Figura 12. Elementos de seguridad

4.2.2. BATERIAS

La resolución 0372 de 2009 emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece los elementos fundamentales que deben conformar los planes de gestión para la devolución de productos posconsumo vinculados a baterías agotadas. En su sección 5, en el apartado b, se define la obligación del usuario o consumidor de entregar los residuos peligrosos posconsumo al sistema de devolución o retorno establecido por el fabricante o importador. A través de la plataforma online "Pilas con el Ambiente", los usuarios pueden coordinar la recolección de baterías agotadas.

Asimismo, la resolución establece las condiciones que deben cumplir los centros de acopio para el manejo seguro de estas baterías usadas. Estas condiciones incluyen:

- Un tope máximo de almacenamiento de 4 toneladas de baterías.

- Un suelo con capacidad de resistir ácidos y con impermeabilización para prevenir la entrada de ácido sulfúrico de baterías derramadas durante la manipulación.
- Un acondicionamiento seguro que integre sistemas de control de derrames, extintores y medidas de seguridad.
- Adecuada ventilación en el espacio de almacenamiento.
- Un área techada que evite la penetración de agua y alejada de fuentes de calor.
- Los desechos deben ser apilados en estanterías con un máximo de tres (3) niveles y hasta un límite de 3 estanterías.
- El área debe ser marcada con señalización acorde a los riesgos inherentes al residuo.

El acatamiento de estos lineamientos resulta de importancia primordial para garantizar una manipulación segura de las baterías utilizadas y prevenir la contaminación ambiental y los riesgos para la salud de los trabajadores y la comunidad en general.

Siguiendo estas directrices, para el proceso de almacenamiento de baterías, se deben colocar en estanterías (Figura 13) y el piso debe contar con resistencia a los ácidos y ser impermeabilizado para prevenir derrames y posibles daños al entorno. Para determinar la cantidad de estanterías requeridas para el almacenamiento semanal, se considera que la capacidad de cada una es de 9 baterías según la norma, y se maneja un flujo semanal de 30 baterías, lo que equivale a un promedio diario de 5 baterías. Por ende, se necesitarían al menos 6 estanterías para el almacenamiento.

Es relevante destacar que las baterías tienen un peso aproximado de 50 kg, lo que implica que se deben contar con al menos dos operarios y una carretilla de carga para su manejo. Las personas encargadas de manipular las baterías deben estar equipadas con la indumentaria de seguridad adecuada, tal como se muestra en la Figura 13, para prevenir riesgos para su salud.

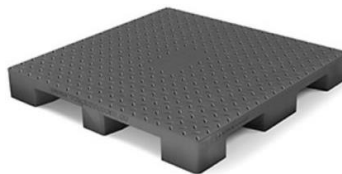


Figura 13. Estiba plástica

Fuente: [75]

4.2.3. GABINETES

Se requiere espacio para almacenar y reparar los gabinetes. El almacenamiento se puede realizar utilizando estibas, estimando la necesidad de entre 2 o 3 estibas, ya que semanalmente se reciben 10 gabinetes, lo que equivale a un promedio diario de 1.6 gabinetes. Cada gabinete pesa alrededor de 100 kg, lo que representa un peso significativo. Por lo tanto, se requiere al menos la presencia de 4 operarios y una carretilla de carga para su correcta manipulación, quienes deben contar con los elementos de seguridad establecidos (Figura 12).

El proceso de reparación de los gabinetes puede involucrar diversos procedimientos, como puntos de soldadura, ajustes mecánicos, cambios de accesorios y pintura, entre otros. Cada proceso puede ser realizado por un técnico y un ayudante. Es importante destacar que, si el gabinete necesita ser movido de sitio, se deben contar con al menos 4 operarios presentes para garantizar su correcta manipulación.

4.2.4. CORAZAS

El proceso al cual serán sometidas las corazas se evidencia en la Figura 14.

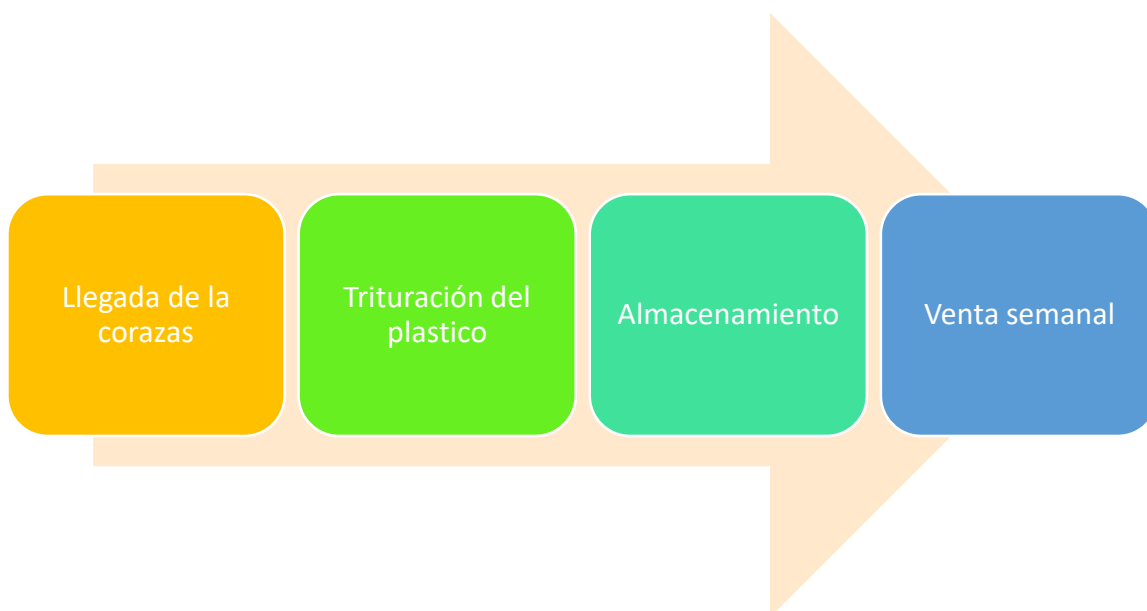


Figura 14. Tratamiento de las corazas

Para el proceso de trituración se requerirá un operario y una máquina trituradora de plástico como la que se presenta en la Figura 15.



Figura 15. Máquina trituradora de plástico

Fuente: [76]

El material resultante se podrá almacenar en contenedores de 240 litros, como se puede observar en la Figura 16. Dado que el flujo semanal de corazas es de 250 kg, se necesitarán al menos tres contenedores para su almacenamiento.



Figura 16. Contenedor de 240 L

Fuente: [77]

La manipulación del plástico triturado podrá ser llevada a cabo por al menos dos trabajadores, cada uno de los cuales deberá estar equipado con los elementos de protección pertinentes. El operario encargado de operar la máquina trituradora deberá emplear protectores auditivos, ya que el procedimiento de trituración podría originar niveles de ruido perjudiciales para la salud.

4.2.5. FIBRAS, JUMPERS Y CABLES

Para el tratamiento de los residuos de cables y fibras ópticas, es importante destacar que se genera un flujo semanal de 870 kg, lo que equivale a un promedio diario de 150 kg. Para su correcto tratamiento, se debe utilizar una máquina peladora de cables (Figura 17) que permita separar la cubierta o carcasa del alma o núcleo del cable. Después de separar el cable del núcleo, se puede almacenar el plástico para su posterior trituración y venta conjunta con el plástico de las corazas. El alma de las fibras ópticas, que es principalmente sílice, se almacena en dos contenedores de 240 L de reciclaje, mientras que el alma de los jumpers y cables se almacena en contenedores separados para su venta semanal correspondiente.

Debido al considerable flujo diario de estos residuos, se requieren al menos 3 operarios debidamente equipados con la indumentaria de seguridad necesaria para llevar a cabo este proceso.



Figura 17. Máquina peladora de cables

Una vez definidas las técnicas, herramientas y procesos para cada RAEE, es necesario sintetizar la información en la Tabla 9 para mejorar su comprensión. Esta tabla permitirá visualizar de manera clara y resumida el flujo de residuos, los procesos, el almacenamiento, el manejo y tratamiento de cada tipo de residuo y los elementos de seguridad necesarios para su correcta manipulación.

Tabla 9. Proceso de tratamiento para la empresa

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	NUMERO DE OPERARIOS	HERRAMIENTAS	ELEMENTOS DE SEGURIDAD	FLUJO	ALMACENAMIENTO	DESTINO FINAL
BBU Y RRU	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	2 operarios	Carretilla de carga	Guantes de seguridad	200 kg/día	Contenedor industrial 1100 L	Centro especializado
				Gafas de seguridad			
				Botas punta de acero			
				Overol			
BATERIAS	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	2 operarios	Carretilla de carga	Guantes de seguridad	5 und/día	Estibas plásticas	Centro especializado
				Gafas de seguridad			
				Botas punta de acero			
				Overol			
GABINETES	Almacenamiento y reparación para su reingreso	4 operarios + 1 técnico	Carretilla de carga	Guantes de seguridad	1,6 und/día	Estibas plásticas	Reingreso
			Equipo de soldadura	Gafas de seguridad			
			Equipo de pintura	Botas punta de acero			
			Herramientas de mano	Overol			
CORAZAS	Trituración del plástico para venta	2 operarios	Maquina trituradora de plástico	Guantes de seguridad	25 kg/día	Contenedor De 240 l	Venta de plástico triturado
				Gafas de seguridad			
				Botas punta de acero			
				Overol			
FIBRAS, JUMPERS Y CABLES	Separación de coraza, almacenamiento y reciclaje del núcleo de la fibra y venta del núcleo de los jumpers y cables	3 operarios	Maquina peladora de cables	Guantes de seguridad	150 kg/día	Contenedor de 240 l para reciclaje	Venta de plástico triturado
				Gafas de seguridad		Contenedor de 240 l para almacenamiento	Reciclaje de sílice
				Botas punta de acero			Venta de cobre y aluminio
				Overol			

La Tabla 9 proporciona información del tratamiento de RAEE:

- BBU y RRU: Este tipo de residuo se almacena semanalmente para su posterior recolección. Se requieren 2 operarios para realizar esta tarea, utilizando una carretilla de carga. Los operarios deben utilizar guantes de seguridad y gafas de seguridad. Se genera un flujo de 200 kg/día de residuos, los cuales se almacenan en un contenedor industrial de 1100 L. El destino final de estos residuos es un centro especializado.
- Baterías: Las baterías también se almacenan semanalmente para su recolección. Se necesitan 2 operarios y una carretilla de carga para realizar esta actividad. Los operarios deben usar guantes de seguridad y gafas de seguridad. El flujo de residuos es de 5 unidades por día, los cuales se almacenan en estibas plásticas. Estos residuos también son llevados a un centro especializado.
- Gabinetes: Los gabinetes se almacenan y reparan para su posterior reingreso. Este proceso requiere 4 operarios y 1 técnico. Se utilizan herramientas como una carretilla de carga, equipo de soldadura, equipo de pintura y herramientas de mano. Los operarios y el técnico deben usar guantes de seguridad, gafas de seguridad, botas punta de acero y overol. Se maneja un flujo de 1.6 unidades por día, y los gabinetes se almacenan en estibas plásticas. El destino final es el reingreso a la operación.
- Corazas: En este caso, las corazas se trituran para su posterior venta. Se necesitan 2 operarios y una máquina trituradora de plástico. Los operarios deben usar guantes de seguridad, gafas de seguridad, botas punta de acero, overol y protectores de oídos. Se genera un flujo de 25 kg/día de residuos, los cuales se almacenan en un contenedor de 240 L. El destino final de estos residuos es la venta de plástico triturado.
- Fibras, Jumpers y Cables: La separación de coraza, almacenamiento y reciclaje del núcleo de las fibras, jumpers y cables requiere 3 operarios. Se utiliza una máquina peladora de cables y se deben usar guantes de seguridad, gafas de seguridad, botas punta de acero y overol. El flujo de residuos es de 150 kg/día, los cuales se almacenan en un contenedor de 240 L para reciclaje y otro contenedor de 240 L para almacenamiento. El destino final incluye el reciclaje de sílice, así como la venta de cobre y aluminio.

Tabla 10. Valor del Centro Especializado

TIPO DE RESIDUO	DESCRIPCIÓN	VALOR DEL CENTRO ESPECIALIZADO (APROXIMADO)
BBU y RRU	Almacenamiento para recolección semanal	\$100.000 - \$150.000
Baterías	Almacenamiento para recolección semanal	\$100.000 - \$150.000
Gabinetes	Almacenamiento y reparación para reingreso	A convenir
Corazas	Trituración del plástico para venta	\$100.000 - \$150.000
Fibras, Jumpers y Cables	Separación de coraza, almacenamiento y reciclaje del núcleo	A convenir

El valor del centro especializado mostrado en la Tabla 10 puede variar dependiendo de los servicios requeridos y el acuerdo alcanzado. La cifra proporcionada es solo un valor aproximado sobre los costos asociados a los servicios específicos que se requieran. El caso considerado es el de RAEE Colombia [78], una empresa especializada en el reciclaje de desechos eléctricos y electrónicos, que contribuye a la sostenibilidad del país mediante la gestión responsable de los componentes eléctricos y electrónicos.

Una vez elaborada la Tabla 9, se ha logrado alcanzar el objetivo específico de diseñar un proceso de tratamiento de RAEE para la empresa Serdán Telecomunicaciones que cumpla con la regulación ambiental establecida por la ley colombiana. A continuación, se llevará a cabo una revisión de la viabilidad económica del proceso diseñado.

5. EVALUACIÓN DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Para determinar la viabilidad económica de diferentes tratamientos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), se utilizó la técnica de dinámica de sistemas (ejemplo en la Figura 18). Para ello, se empleó el programa virtual INSIGHTMAKER, el cual se basa en los diagramas de Forrester y permite realizar análisis numéricos para obtener las respuestas de las diferentes variables a lo largo del tiempo. De esta manera, fue posible sustentar el efecto en la situación financiera de la organización.

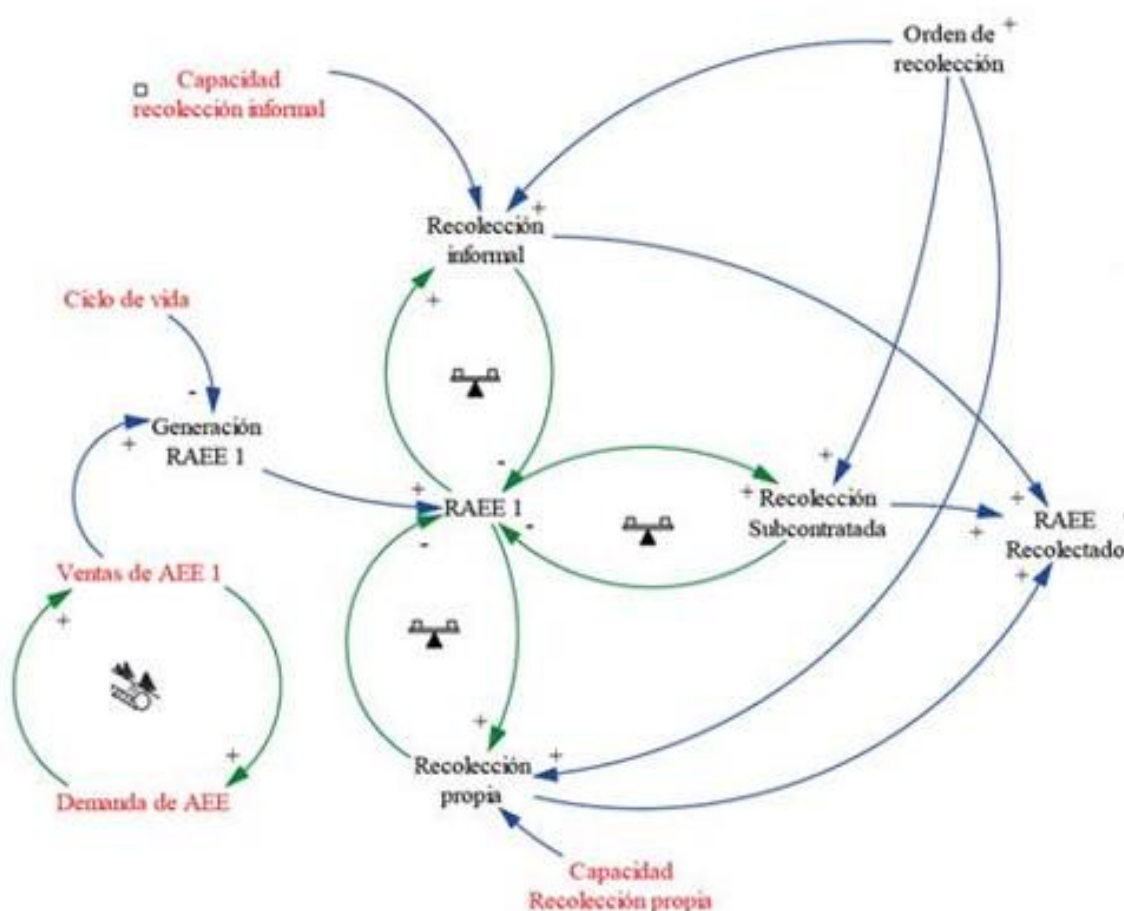


Figura 18. Relación entre las ventas de RAEE y la demanda de este.

Fuente: [79]

El diagrama presentado en la Figura 18 representa la interacción entre las ventas de las RAEE y la demanda asociada. Este gráfico simplificado nos permite visualizar y comprender de manera más clara cómo estas dos variables se relacionan en el contexto que estamos analizando. Al estudiar esta representación gráfica, podemos obtener una visión más

accesible y facilitar el análisis de la dinámica de sistemas entre las ventas de la RAEE y su demanda en nuestro caso específico.

En la Figura 19 se presenta el análisis general de la propuesta, donde se destaca que la viabilidad depende de los ingresos y costos mensuales. En cuanto a los costos, se pueden distinguir diferentes tipos: los costos directos, que se asocian a la producción del servicio, producto o proyecto; los costos indirectos, que son los gastos fijos necesarios para poner en marcha el negocio; los costos intangibles, que no se pueden medir en términos monetarios y que incluyen el impacto en la percepción de la marca o la satisfacción de los clientes; y los costos de riesgos potenciales, que se refieren a los gastos imprevistos que se deberán afrontar si surgen obstáculos en el proyecto.

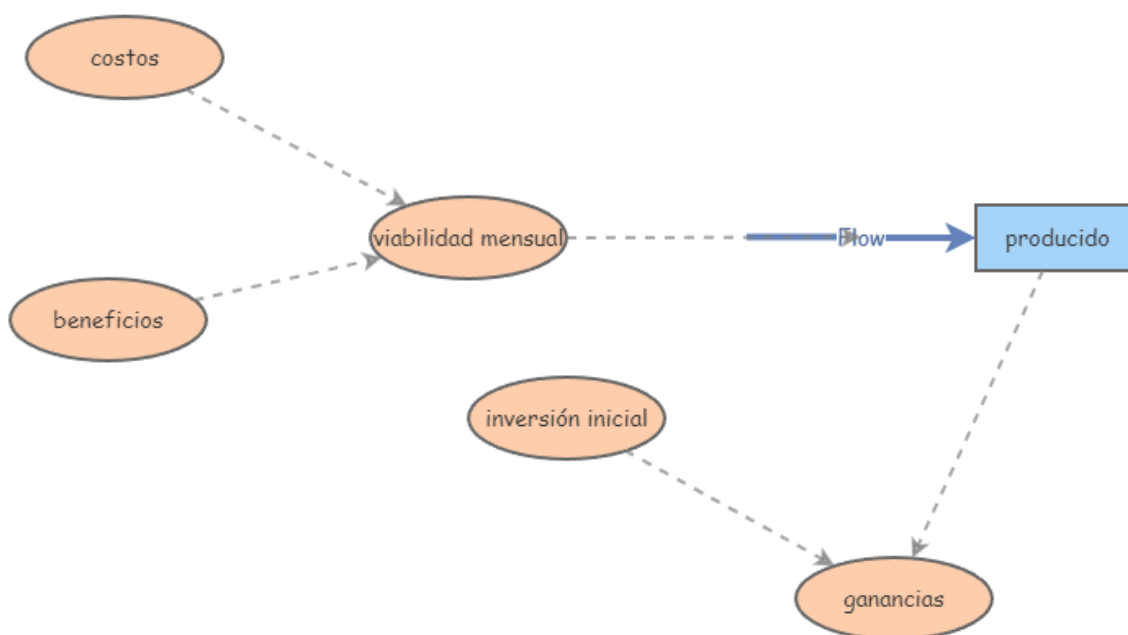


Figura 19. Diagrama de Forrester

Fuente: Imagen proporcionada por la aplicación INSIGHTMAKER

Por otro lado, los beneficios mensuales pueden ser directos, cuando se pueden medir en términos monetarios, o indirectos, cuando se perciben, pero no se pueden cuantificar económicamente. La viabilidad mensual se refiere a la capacidad de un proyecto o inversión para generar ingresos y beneficios suficientes para cubrir sus costos y obtener ganancias.

Para determinar la viabilidad económica, se evaluará el factor de ganancias generado en un plazo de 8 años (mediano plazo). Este factor de ganancias comenzará a ser considerado

una vez que se haya recuperado la inversión inicial, es decir, cuando el producido supere la inversión inicial.

Tabla 11. Costos, beneficios e inversión

COSTOS DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO	
DESCRIPCIÓN	VALOR
SERVICIOS	\$1.562.400
MANTENIMIENTO MENSUAL DE LAS MAQUINAS	\$200.000
PAGO NOMINA+CARGA PRESTACIONAL+ COSTOS POR DOTACIÓN+ ARRIENDO DEL LOCAL PARA EL TRATAMIENTO	\$23.445.000
TOTAL COSTOS	\$25.207.400
BENEFICIOS DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO	
DESCRIPCIÓN	VALOR
VENTA DE PLASTICO TRITURADO	\$910.000
VENTA DE COBRE	\$26.400.000
VENTA DE ALUMINIO	\$3.600.000
TOTAL BENEFICIOS	\$30.910.000
INVERSIÓN INICIAL	
DESCRIPCIÓN	VALOR
MAQUINARIA Y EQUIPOS DE ALMACENAMIENTO	\$18.434.767
DOTACIONES	\$2.057.500
HERRAMIENTAS	\$2.143.000
TOTAL INVERSIÓN	\$22.635.267

La Tabla 11 muestra los valores de los costos, beneficios e inversión de la propuesta del tratamiento de RAAE. Los costos serán por los servicios que se requieran para el proceso de tratamiento, el mantenimiento de las máquinas, el arriendo del sitio donde se hará el proceso de tratamiento y el pago de nómina.

En los servicios se tomó en cuenta la cantidad de luz consumida por las máquinas y un 20% más de ese valor para otros servicios, las maquina trituradora consume 19 kW y su uso se estima para dos horas diarias 5 días a la semana y la maquina peladora de cable consume 4 kW y su uso se estima para 6 horas diarias, el precio de la electricidad en Colombia está en aproximadamente \$700 por kWh lo que significa que, en un mes, las maquinas consumen \$1.302.000.

El costo de mantenimiento de las maquinas consiste en los elementos que requieran cambios mes a mes como rodamientos, cables, accesorios en general, etc.

El arriendo estipulado es de máximo \$ 10.000.000, pues según información de páginas de arrendamiento en Bogotá como metrocuadrado.com, hay bodegas en zona franca de aproximadamente 500 m² con valores que oscilan entre los 8 y 10 millones de pesos.

El pago de nómina se estipulo para cinco (5) operarios con un sueldo mínimo, un (1) técnico con un sueldo de \$1.500.000 y un (1) jefe de mantenimiento con un sueldo de \$1.600.00. A los costos por salarios hay que añadir la carga prestacional. La empresa maneja un 45% del salario para seguro médico, seguro de vida, bonificaciones, vacaciones, días libres, aportes a fondos de pensiones, entre otros. Otros costos establecidos se deben al proceso de entrega de dotación (este proceso se realiza cuatrimestralmente).

La parte de los valores de los beneficios está definida por la venta del plástico triturado, cobre y aluminio. El valor del plástico triturado en Colombia está alrededor de \$650 por kilogramo, gracias a las corazas y al 30% del peso de los cables, jumper y fibras la empresa produce al mes 1400 kg de plástico triturado. Asumiendo que el 40% del peso de los cables y jumpers son de cobre se pueden vender a \$22.000 por kilogramo y el 30% restante de aluminio se puede vender a \$5.000 por kilogramo, estos precios son los estandarizados comercialmente como chatarra.

La inversión inicial corresponde a la compra de

Maquinas

- Peladora de cables de la marca CREWORKS: \$1.634.467
- Trituradora de plástico marca ASIAN MACHINERY USA modelo VMWT2260: \$4.250.000

Equipos de almacenamiento

- 7 contenedores de 240 L marcan ESTRA modelo forte: \$450.000 c/u
- 2 contenedores industriales 1100 L de la marca KLEINE WOLK: \$ 1.700.000 c/u
- 10 estibas ER 1012C de HOMECENTER: \$ 4.739.900

Dotaciones

- Botas punta de acero: \$125.000
- Guantes protectores y antigolpes: \$ 45.000
- Overol: \$ 90.000
- Gafas de seguridad: \$ 12.500
- Protector de oídos: \$ 75.000

Herramientas:

- 3 carretillas Zorra De Carga 200 Kg de MERCADOLIBRE: \$ 229.000
- Equipo de soldadura 60-250amp 110/220V Ciclo 10% Electrodo 2-5mm Bauker: \$ 500.000
- Equipo de pintura con compresor de aire eléctrico portátil Pretul COMP-KIT20P monofásico 20L 1100W 127V 60Hz amarillo: \$ 700.000
- Set de Herramientas Manuales de 250 Piezas de Homecenter: \$ 253.000

Todos estos valores dan una inversión inicial de \$22.635.267. Colocando estos valores en la herramienta virtual INSIGHTMAKER obtenemos la Figura 20

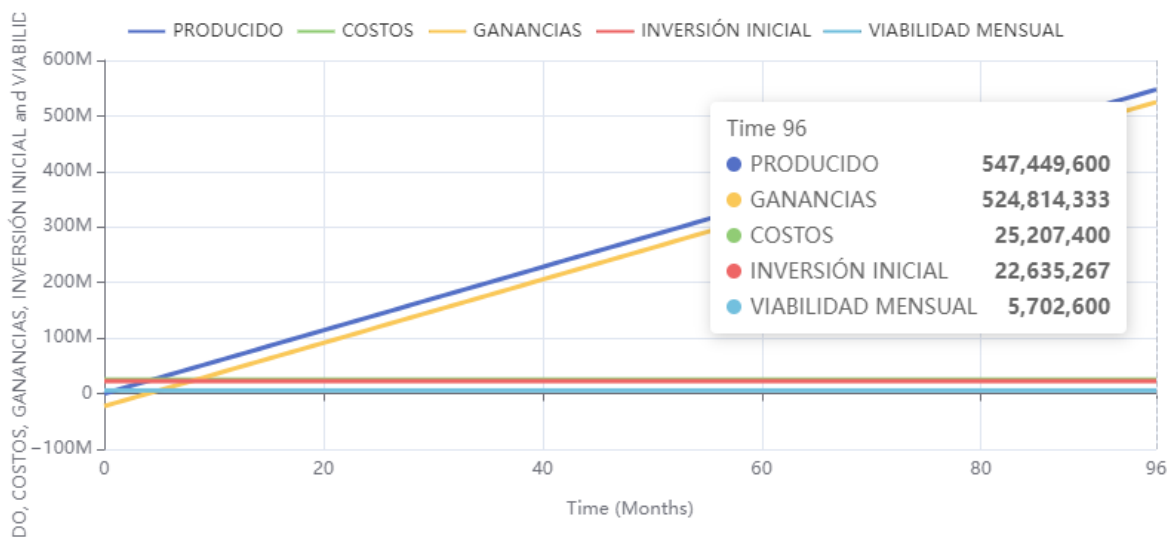


Figura 20. Viabilidad del proceso establecido

En la Figura 20, los términos "producido", "costos" y "ganancias" se refieren a los mismos conceptos que los "beneficios" mencionados anteriormente en la Figura 19. A continuación, se proporciona una explicación más detallada de estos términos:

- **Producido:** Es la cantidad de ingresos generados por el proyecto o la inversión. Representa los ingresos totales obtenidos por la venta de productos o servicios.
- **Costos:** Son los gastos asociados a la producción del servicio, producto o proyecto. Estos costos pueden ser directos (relacionados con la producción en sí) o indirectos (gastos fijos necesarios para poner en marcha el negocio). También se incluyen los costos intangibles, que son aquellos que no se pueden medir en términos monetarios, como el impacto en la percepción de la marca o la satisfacción de los clientes, y los costos de riesgos potenciales, que son los gastos imprevistos que podrían surgir en caso de obstáculos en el proyecto.
- **Ganancias/Beneficios:** Representan la diferencia entre los ingresos (producido) y los costos. Es el resultado económico positivo obtenido después de cubrir todos los gastos.
- **Con relación al umbral de equilibrio,** se hace referencia al nivel de actividad o ventas en el cual los ingresos producidos igualan de manera precisa a los desembolsos totales. Es el punto en el cual no se generan utilidades ni pérdidas. Calcular el umbral de equilibrio es fundamental para analizar la sostenibilidad financiera de un proyecto y establecer la cantidad mínima de ventas requerida para cubrir los desembolsos.
- **La viabilidad mensual:** se refiere a la capacidad de un proyecto o inversión para generar ingresos y beneficios suficientes en un período mensual. Es un indicador importante para evaluar la sostenibilidad económica a corto plazo y determinar si los ingresos generados en un mes determinado son suficientes para cubrir los costos y obtener ganancias.

Se puede observar en la Figura 20 que la inversión inicial se recupera en aproximadamente cinco meses y que en un periodo de 8 años (96 meses) se generan ganancias acumuladas de alrededor de 525 millones de pesos. Con estos resultados se puede concluir que la propuesta es económicamente viable, cumpliendo así con el tercer objetivo establecido.

6. MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN

El manual creado para implementar la propuesta establecida en el segundo objetivo se ha desarrollado con el fin de ser utilizado por empresas similares. Debido a su extensión, se adjuntará como anexo al proyecto (Ver Anexo A).

Este manual cuenta con el paso a paso que deben seguir las empresas de telecomunicaciones que tengan residuos similares a los mencionados para el correcto tratamiento de RAEE. También define las herramientas a utilizar, el almacenamiento de cada residuo, la disposición final, los elementos de seguridad, entre otros.

7. CONCLUSIONES

El manejo adecuado de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en empresas de telecomunicaciones es esencial para minimizar los impactos ambientales y cumplir con las regulaciones vigentes. Implementar un proceso de gestión de RAEE efectivo aborda este desafío de manera eficiente, promoviendo la reducción de riesgos ambientales y mejorando la imagen corporativa de las empresas involucradas.

En esta investigación, se abordaron varios objetivos fundamentales relacionados con la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en empresas de telecomunicaciones, centrándose en el caso de estudio de Serdán Telecomunicaciones en Colombia. A través de un enfoque integral, se lograron avances significativos en la gestión de estos residuos.

En primer lugar, se reconoció la importancia de comprender el entorno empresarial y las operaciones de compañías como Serdán Telecomunicaciones, que generan cantidades significativas de RAEE. La semejanza en las prácticas operativas y la generación de RAEE en empresas de telecomunicaciones similares subraya la importancia de una estrategia de gestión específica para enfrentar este desafío compartido.

El proceso de diseño de un tratamiento de RAEE adaptado a las necesidades de Serdán Telecomunicaciones demostró ser esencial. Este proceso garantiza el cumplimiento riguroso de las regulaciones ambientales colombianas, considerando aspectos como el almacenamiento, las herramientas, los elementos de seguridad y la disposición final de manera integral.

La técnica de dinámica de sistemas fue fundamental para evaluar la viabilidad económica del proceso de gestión de RAEE implementado por Serdán Telecomunicaciones. Los resultados son contundentes: la inversión inicial de \$22.635.267 realizada por Serdán Telecomunicaciones se recupera en aproximadamente cinco meses, generando ganancias acumuladas de alrededor de 525 millones de pesos en un período de ocho años. Esto subraya la importancia de una gestión eficiente de los RAEE, que beneficia tanto al medio ambiente como a la rentabilidad a largo plazo.

La creación de un manual de gestión de RAEE basado en el caso de estudio de Serdán Telecomunicaciones es un logro destacado. Este manual proporciona una guía específica

y detallada para una gestión efectiva y sostenible de los RAEE, asegurando el cumplimiento de las regulaciones ambientales y promoviendo prácticas responsables. Su aplicación en empresas similares puede mejorar significativamente la gestión de los RAEE y reducir los impactos ambientales negativos.

Las empresas que generan RAEE, buscan cumplir regulaciones ambientales y promover prácticas sostenibles, y desean gestionar adecuadamente los residuos para minimizar impactos ambientales y riesgos para la salud se beneficiarán directamente de este enfoque. Aunque el caso de estudio se centró en Serdán Telecomunicaciones, las lecciones aprendidas y las prácticas recomendadas tienen aplicabilidad en empresas similares en Colombia.

Finalmente, este proyecto de investigación contribuye de manera significativa al campo, al emplear conocimientos teóricos y herramientas metodológicas avanzadas, como la dinámica de sistemas y el uso de INSIGHTMAKER para evaluar la viabilidad económica. En resumen, el desarrollo e implementación de un proceso de gestión de RAEE en empresas de telecomunicaciones en Colombia se presenta como un imperativo fundamental para asegurar una disposición final apropiada de los residuos, reducir su impacto ambiental y fomentar el desarrollo sostenible, al mismo tiempo que genera beneficios económicos duraderos.

8. RECOMENDACIONES

Implementar el proceso de gestión propuesto en otras empresas de telecomunicaciones en Colombia, adaptándolo a las necesidades y regulaciones específicas de cada organización. Es importante reconocer que cada empresa puede tener particularidades en términos de generación y tipos de RAEE, por lo que se recomienda realizar un análisis detallado de los residuos generados y adaptar el proceso de gestión en consecuencia. Asimismo, es fundamental asegurarse de cumplir con las regulaciones ambientales y normativas locales relacionadas con la gestión de RAEE.

Fomentar la colaboración y el intercambio de prácticas ejemplares entre las entidades del ámbito de las telecomunicaciones para potenciar la gestión de los RAEE. Establecer alianzas y compartir experiencias exitosas en la administración de desechos electrónicos puede resultar altamente provechoso para todas las organizaciones involucradas. Esto permitirá asimilar las mejores prácticas implementadas por otras empresas, detectar oportunidades de optimización y estimular la adopción de estándares superiores en la gestión de residuos electrónicos.

Mantener un seguimiento y una evaluación constante del procedimiento de gestión instaurado, implementando ajustes y mejoras cuando sea pertinente. La implementación de un enfoque para la gestión de RAEE no debe entenderse como un proyecto concluido, sino como un proceso evolutivo en constante perfeccionamiento. Es fundamental instaurar mecanismos de supervisión y evaluación para detectar posibles desviaciones, evaluar el logro de los objetivos y realizar adaptaciones o mejoras en el procedimiento. Esto asegurará la eficacia y la sostenibilidad a largo plazo de las acciones emprendidas.

Considerar la posibilidad de establecer programas de capacitación y concienciación dirigidos al personal involucrado en la manipulación de los RAEE. La sensibilización y la formación adecuada del personal desempeñan un papel fundamental en garantizar la adecuada segregación, manejo y disposición final de los desechos electrónicos. Esto podría abarcar la instrucción en buenas prácticas para la gestión de RAEE, la utilización de equipos de protección individual, y la promoción de una cultura de responsabilidad ambiental en toda la estructura organizativa. Explorar oportunidades de economía circular y valorización de los RAEE. Además de implementar un proceso de gestión adecuado, se recomienda investigar y evaluar la viabilidad de programas de reciclaje, reutilización o valorización de

los residuos electrónicos. Esto permitirá maximizar el uso de los recursos y minimizar el impacto ambiental, al tiempo que puede generar oportunidades económicas adicionales para las empresas de telecomunicaciones.

En resumen, se recomienda implementar el proceso de gestión propuesto en otras empresas de telecomunicaciones, adaptándolo a sus necesidades específicas y promoviendo la colaboración entre las organizaciones del sector. Además, se enfatiza la importancia de monitorear y evaluar continuamente el proceso, así como de brindar capacitación adecuada y explorar oportunidades de economía circular. Estas recomendaciones contribuirán a mejorar el manejo de los RAEE en el sector de las telecomunicaciones en Colombia y a reducir su impacto ambiental.

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

ANEXOS

Anexo A. Manual

MANUAL DE TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

Introducción

Los dispositivos eléctricos y electrónicos están formados por una combinación compleja de piezas que requieren de campos electromagnéticos para funcionar y realizar determinadas tareas. Cuando se considera que ya no son útiles y se descartan, se convierten en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

El rápido avance tecnológico en las últimas décadas ha resultado en un aumento global en la cantidad de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Las empresas de telecomunicaciones, en particular, desempeñan un papel importante en este problema, ya que un número cada vez mayor de personas utiliza sus dispositivos para acceder a Internet y comunicarse a través de redes móviles. De acuerdo con una investigación realizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), "las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con las TIC aumentaron del 2,5% en 2007 al 3,7% en 2012" [1]. Además, la UIT estima que habrá 25 mil millones de dispositivos conectados a Internet en todo el mundo para el año 2025 [2].

Estos dispositivos, que incluyen teléfonos móviles, laptops, enrutadores y otros equipos de telecomunicaciones, contienen materiales valiosos como metales preciosos y plásticos. Sin embargo, también albergan sustancias tóxicas como plomo, mercurio y cadmio, que pueden tener consecuencias negativas para la salud humana y el entorno si no se gestionan adecuadamente [3].

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

La gestión adecuada de los RAEE en empresas de telecomunicaciones es esencial para mitigar su impacto ambiental y cumplir con los requerimientos regulatorios. Para alcanzar este objetivo, resulta crucial implementar un manual integral de gestión de RAEE que aborde la identificación, clasificación, almacenamiento, transporte y disposición final adecuada de estos desechos.

En este contexto, surge la propuesta de un manual completo de gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) dirigido a las empresas de telecomunicaciones. Este manual no solo establecerá procedimientos claros y eficaces para la gestión de tales desechos, sino que también concienciará al personal sobre la importancia de una gestión adecuada de los RAEE.

PARTE A. MARCO TEÓRICO

A.1 Panorama global de los RAEE

El aumento en la producción de dispositivos electrónicos y tecnologías de la información y comunicación (TIC) ha resultado en la generación significativa de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). En 2006, se vendieron alrededor de 230 millones de computadoras y mil millones de teléfonos móviles en todo el mundo, lo que se tradujo en alrededor de 5.8 millones de toneladas de desechos [4]. Los RAEE representan la categoría de desechos que más rápidamente crece y se prevé que su producción se triplique en las naciones en desarrollo para 2010.

En Europa, los desechos electrónicos aumentan tres veces más rápido que el total de los residuos generados. En la Unión Europea (UE27), se generan alrededor de 8.7 millones de toneladas de RAEE cada año, pero solo se recolecta y recicla un 25% de esa cantidad [5]. En los Estados Unidos, menos del 20% de los tipos de

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

desechos electrónicos se separan para su tratamiento y recuperación, mientras que el resto se quema, almacena o exporta.

En 2004, se estima que alrededor de 100 millones de computadoras personales quedaron obsoletas y en conjunto, se calcula que entre 20 y 50 millones de toneladas de productos electrónicos desechados se generan anualmente en todo el mundo [6]. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en 2019 se produjeron 53.6 millones de toneladas métricas de RAEE en todo el mundo, y se espera que esta cifra alcance las 74.7 millones de toneladas métricas para 2030 [7].

Este aumento en la generación de RAEE se debe a varios factores, entre ellos el aumento en el consumo mundial de dispositivos electrónicos. Se prevé que la cantidad de usuarios de teléfonos móviles en el mundo supere los 5.000 millones para 2025 [8], lo que representa un incremento del 9% en comparación con 2020. Además, la rápida innovación tecnológica y la disminución en la vida útil de los dispositivos electrónicos también contribuyen a la generación de RAEE [9]. Se anticipa que la producción global de RAEE seguirá aumentando en los próximos años.

A.2 Panorama en América Latina

En América Latina, el reciclaje de desechos eléctricos y electrónicos (RAEE) es una práctica relativamente nueva. Según un informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), la región produce aproximadamente 3.9 millones de toneladas de RAEE cada año, con un aumento anual del 5%. Sin embargo, solo el 10% de estos desechos se recoge y trata adecuadamente [10].

Empresas tradicionales dedicadas al reciclaje de metales en países como Chile, Argentina, Perú, Colombia y Brasil han incursionado en el mercado de reciclaje de desechos eléctricos y electrónicos, pero las cantidades recicladas son modestas debido a la falta de un marco político e infraestructura logística adecuados. Estas compañías suelen centrarse en componentes valiosos como las placas de circuito

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

impreso, descuidando la disposición adecuada de otros elementos que carecen de valor económico, pero presentan riesgos para la salud y el medio ambiente. Por ejemplo, en Chile, solo se recicla entre el 1.5% y el 3% de los RAEE generados [11], y la mayoría de las empresas atienden a grandes corporaciones, mientras que el sector informal se enfoca en obtener ganancias de los componentes valiosos extraídos de los desechos domésticos.

Un análisis de diversos escenarios para evaluar el potencial de reciclaje de RAEE en Chile, Colombia y Perú estimó que para 2030, Colombia tendría la mayor generación de RAEE (302,342 toneladas), seguida de Chile (232,901 toneladas) y Perú (189,900 toneladas). Además, se proyectó que la tasa promedio de crecimiento anual en la generación de RAEE para estos tres países en el período de 2020 a 2030 sería del 3.4%, en línea con las estimaciones registradas en la literatura, que varían entre el 3% y el 4% [10].

A.3 Situación en Colombia

En Colombia, se encuentran presentes regulaciones ambientales de larga data en América Latina que se centran en la preservación del medio ambiente. Mediante un Decreto-Ley emitido en 1974, el Código de Recursos Naturales establece la obligación de gestionar, tratar o eliminar residuos y desechos en función de su volumen o cantidad. A pesar de esto, el gobierno colombiano aún no había implementado un sistema de gestión para cumplir con esta normativa.

En el año 2007, se estimó que en Colombia se generaron entre 6,000 y 9,000 toneladas de desechos provenientes de computadoras, monitores y periféricos, lo que equivale a aproximadamente 0.1 a 0.15 kg por persona [12].

En 2009, comenzó a debatirse la posibilidad de implementar una política pública a nivel nacional para la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en Colombia, a través del proyecto de Ley 273. El propósito de este proyecto es establecer directrices para la categorización, producción,

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

comercialización, tratamiento, reciclaje y disposición final de los RAEE generados en el país, además de imponer obligaciones sobre los importadores, productores, comerciantes y generadores de RAEE.

En julio de 2013, se aprobó en el Congreso de la República la Ley 1672, que establece las pautas para implementar una política pública de manejo integral de residuos de dispositivos eléctricos y electrónicos (RAEE), incluyendo otras disposiciones.

Con el rápido avance tecnológico y, por lo tanto, el aumento de los residuos eléctricos, se prevé que para el año 2018 se generarán a nivel global 49.8 millones de toneladas de residuos de dispositivos eléctricos y electrónicos (RAEE o "ewaste"). De esta cantidad, se estima que 286,000 toneladas corresponderán a desechos producidos en Colombia, según una investigación realizada por las Naciones Unidas [13].

A.4 Definiciones de AEE y RAEE

La Directiva 2012/19/UE de la Unión Europea establece la definición de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) como aquellos que requieren corriente eléctrica o campos electromagnéticos para su funcionamiento y que mantienen una tensión nominal dentro de los límites especificados. Por contraste, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se caracterizan como los AEE que los propietarios descartan, así como sus componentes, subconjuntos y suministros que formaban parte del producto en el momento del desecho.

No obstante, la definición de RAEE varía en el contexto global y puede diferir en diversas legislaciones y guías técnicas. Por ejemplo, la iniciativa StEP aborda a los AEE como cualquier dispositivo de uso doméstico o empresarial que incluya circuitos o componentes eléctricos y cuente con fuente de energía o baterías. Mientras tanto, los RAEE engloban los artículos de distintas categorías de aparatos

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

eléctricos y electrónicos y sus partes que los propietarios desechan como residuo sin la intención de reutilizarlos [14].

La OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) definió en 2001 los residuos electrónicos como "todo dispositivo que emplea energía eléctrica y que ha llegado al término de su vida útil" [15]. En contraposición, el BAN (Basel Action Network) amplió esta descripción en 2002 para abarcar una variedad de dispositivos electrónicos, que van desde electrodomésticos de gran tamaño como refrigeradores y aires acondicionados, hasta dispositivos electrónicos de consumo como teléfonos móviles, sistemas de audio y computadoras desechadas por los usuarios [16].

A.5 Categorías

La forma más común de categorizar los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en términos de su comercialización, según la Directiva 2002/96/CE de la Unión Europea, se divide en tres líneas identificadas por colores de la siguiente manera:

- Línea blanca: Incluye una variedad de electrodomésticos, tanto grandes como pequeños, como por ejemplo, refrigeradores, lavadoras, lavavajillas, hornos y cocinas.
- Línea marrón: Contiene todos los dispositivos electrónicos de consumo, como televisores, sistemas de sonido y equipos de video.
- Línea gris: Engloba los equipos de cómputo (computadoras, teclados, ratones, entre otros) y de comunicación (teléfonos móviles, dispositivos portátiles, etc.).

A.6 Características, composición y potencial de reciclaje de los RAEE.

Los desechos originados por los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) presentan una amplia diversidad de componentes, que incluyen más de mil

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

sustancias distintas categorizadas como "no peligrosas" o "peligrosas". Según Greenpeace (2011), los elementos con potencial de riesgo pueden representar hasta el 3% del contenido total de los RAEE [17]. Entre los materiales comunes se encuentran metales ferrosos y no ferrosos, plásticos, vidrio, madera, tarjetas de circuito impreso, cerámica, caucho, entre otros. Los metales como el hierro y el acero predominan en los RAEE, comprendiendo alrededor del 50%, seguidos por los plásticos (21%) y los metales no ferrosos (13%).

Los RAEE son catalogados como desechos peligrosos si contienen ciertas cantidades de determinados elementos que superan los límites establecidos por las regulaciones nacionales. La Tabla 1 detalla la composición de algunas de las categorías más representativas de los aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, así como su distribución en diversas partes.

Tabla 1. Categorías y composición de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE.

SUSTANCIA	PRESENCIA EN RAEE
COMPUESTOS HALOGENADOS	
PCB (Policloruros de bifenilo)	Condensadores, transformadores
Retardantes de llama para plásticos	(Componentes termoplásticos, cables, tarjetas madre, circuitos, revestimientos, plásticos, etc)
TBBA (Tetrabromo-bifenol-A)	TBBA actualmente es el retardante de llama más utilizado
PBB (Polibromobifenilos)	en placas de circuitos y carcasas
PBDE (Polibromodifenilo éteres) Clorofluorocarbonados (CFC)	Unidades de refrigeración, espumas aislantes
METALES PESADOS Y OTROS METALES	
Arsénico	En pequeñas cantidades en diodos emisores de luz, procesadores de pantallas de cristal líquido LCD
Bario	Utilizado en "getters" en tubos de rayos catódicos (TRC) en la cámara de ventilación de pantallas TRC y lámparas fluorescentes

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

SUSTANCIA	PRESENCIA EN RAEE
Berilio	Presente en cajas de fuentes de alimentación eléctrica
Cadmio	Baterías recargables de Ni-Cd, capa fluorescente en pantallas TRC, fotocopiadoras, contactos e interruptores, tubos de rayos catódicos antiguos
Cromo VI	Discos duros y de almacenamiento de datos
Plomo	Pantallas TRC, tarjetas de circuito, cableado y soldaduras
Mercurio	En lámparas fluorescentes de LCDs, algunos interruptores con mercurio (sensores), sistemas de iluminación en pantallas planas, cafeteras electrónicas con desconexión automática, relojes despertadores con relés de mercurio
Níquel	Baterías recargables de Ni-Cd y Ni-Hg y pistola de electrones en los monitores TRC
Elementos raros (Ytrio, Europio)	Capa fluorescente (Monitores TRC)
Selenio	Fotocopiadoras antiguas
Sulfuro de zinc	Mezclado con metales raros en el interior de monitores TRC
OTROS	
Sustancias radioactivas (Americio)	Presentes en equipos médicos, detectores de incendios, detectores de humo, entre otros.

Con el fin de realizar una gestión completa y eficiente de los RAEE, se ha considerado la estructuración de los recursos enfocada a lograr la reducción de residuos a través de una correcta separación, para aprovecharlos siempre que sea técnicamente, ambiental y sanitariamente factible. A continuación, se presentan las diferentes etapas en las que se lleva a cabo la gestión de los residuos.

A.7 Impacto a la salud humana y el ambiente

En países en desarrollo o en transición, ciertos enfoques de recuperación utilizados para abordar los desechos electrónicos pueden tener repercusiones negativas en la salud humana y el entorno, como la exposición a altas temperaturas sin control o la falta de tecnologías especializadas [18]. Esto se debe a la presencia de sustancias tóxicas como metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes, retardantes de llama y otros

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

agentes perjudiciales. Estas sustancias pueden liberarse durante los procesos de recuperación y reciclaje de los RAEE, aumentando la exposición directa o indirecta de las personas a compuestos peligrosos. La exposición directa puede involucrar el contacto con la piel con estos elementos, la inhalación de partículas finas y gruesas, así como la ingesta de partículas contaminadas. La exposición indirecta ocurre cuando la contaminación ambiental resultante de la extracción inadecuada de materiales reutilizables de los RAEE afecta el suelo, el aire y el agua [19]. Prácticas no seguras, como la incineración de residuos, la liberación de ácidos y la inadecuada gestión de los gases en los procesos de reciclaje, son ejemplos que aumentan el riesgo de exposición a sustancias peligrosas. En países con niveles industriales bajos, las técnicas inseguras utilizadas para la recuperación de materiales valiosos aumentan el riesgo de exposición a compuestos dañinos [14].

PARTE B - MANEJO

Con el fin de realizar una gestión completa y eficiente de los RAEE, se ha considerado la estructuración de los recursos enfocada a lograr la reducción de residuos a través de una correcta separación, para aprovecharlos siempre que sea técnicamente, ambiental y sanitariamente factible. A continuación, se presentan las diferentes etapas en las que se lleva a cabo la gestión de los residuos.

B.1 Identificación y clasificación

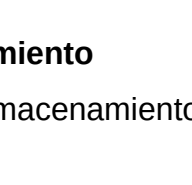
Los desechos de la compañía corresponden a la categoría de línea gris, que engloba los dispositivos informáticos y de telecomunicaciones. Por otro lado, la subcategoría denominada está definida por:

- Placas electrónicas: BBU y RRU
- Baterías
- Gabinetes
- Corazas
- Fibras, jumpers y cables

La Tabla 2, muestra cada residuo, su identificación y descripción.

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

Tabla 2. Tipo de residuos

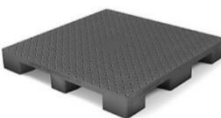
NOMBRE RESIDUO	REGISTRO FOTOGRAFICO	DESCRIPCIÓN
RRU		Unidad de radio remota se encarga de procesar y amplificar las señales de radio antes de enviarlas a través de las antenas hacia los dispositivos móviles.
BBU		Unidad de Banda Base se encarga del procesamiento de la señal en la red de acceso móvil, convirtiendo las señales analógicas que se reciben de los dispositivos móviles en señales digitales
BATERIAS		proporcionan energía de respaldo para mantener los servicios de telecomunicaciones en caso de cortes de energía o interrupciones en la red.
GABINETE		carcasa o contenedor utilizado para alojar equipos de red y telecomunicaciones, como servidores, switches, routers, amplificadores, convertidores de medios y otros componentes.
CORAZAS		componentes utilizados para proteger y asegurar la integridad de los cables de fibra óptica.
FIBRAS		tipo de cable utilizado para transmitir información a través de pulsos de luz
JUMPER		cable corto que se utiliza para conectar dos elementos de un sistema, generalmente en una red de transmisión de señales.
CABLE		es un conductor que se utiliza para transmitir señales de información

B.2 Almacenamiento

Los distintos almacenamientos en la empresa se ven identificados en la Tabla 3.

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

Tabla 3. Tipos de almacenamientos en la empresa

ALMACENAMIENTO	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
CONTENEDOR INDUSTRIAL		Contenedor de 1100 L de capacidad. Este contenedor tiene como objetivo almacenar las placas electrónicas: BBU y RRU
ESTIBA PLÁSTICA		Estiba de plástico resistente 100x120x15 cm, destinada para el almacenamiento de las baterías y gabinetes
CONTENEDOR		Contenedor de 240 L, destinado a: - Almacenamiento del núcleo de jumpers y cables. - Almacenamiento de plástico triturado de las corazas y cubiertas de los cables, jumpers y fibras. - Almacenamiento de sílice de las fibras ópticas

B.3 Tratamiento de cada RAEE

De manera global, la secuencia que la compañía lleva a cabo para el manejo individual de los RAEE se encuentra representada en la Figura 1.

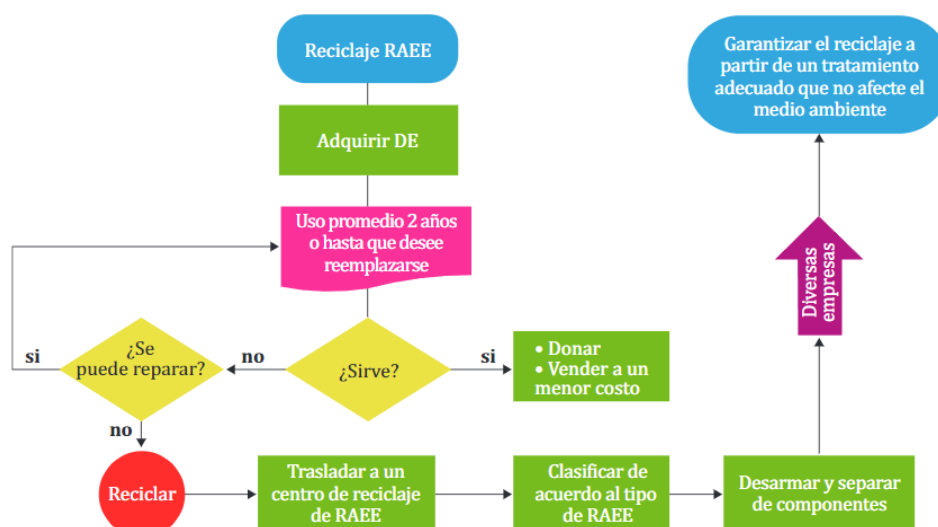


Figura 1. Diagrama de flujo de los RAEE

Fuente: [68]

MANUAL TRATAMIENTO DE RAAE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

El proceso de cada RAAE en específico se puede apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Tratamiento de los RAAE

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	NUMERO DE OPERARIOS	HERRAMIENTAS	ALMACENAMIENTO	DESTINO FINAL
BBU RRU	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	2 operarios	Carretilla de carga	Contenedor industrial 1100 L	Centro especializado
BATERIAS	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	2 operarios	Carretilla de carga	Estibas plásticas	Centro especializado
GABINETES	Almacenamiento y reparación para su reingreso	4 operarios y 1 técnico	Carretilla de carga Equipo de soldadura Equipo de pintura Herramientas de mano	Estibas plásticas	Reingreso
CORAZAS	Trituración del plástico para venta	2 operarios	Maquina trituradora de plástico	Contenedor De 240 l	Venta de plástico triturado
FIBRAS JUMPERS CABLES	Separación de coraza, almacenamiento y reciclaje del núcleo de la fibra y venta del núcleo de los jumpers y cables	3 operarios	Maquina peladora de cables	Contenedor de 240 l para reciclaje Contenedor de 240 l para almacenamiento	Venta de plástico triturado Reciclaje de sílice Venta de cobre y aluminio

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

B.4 Máquinas y herramientas

Las herramientas que se usan en el proceso de tratamientos de RAEE están identificadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Máquinas y herramientas

DISPOSITIVO	IMAGEN	FUNCIÓN
MAQUINA TRITURADORA		Triturar plástico proveniente de las corazas y cubiertas de los cables, jumpers y fibras.
MAQUINA PELADORA DE CABLES		Separar el núcleo del cable de la cubierta.
EQUIPO DE SOLDADURA		Herramienta para la restauración de los gabinetes
EQUIPO DE PINTURA		Herramienta para la restauración de los gabinetes
CARRETA ZORRA		Herramienta para el desplazamiento de las baterías, gabinetes y placas electrónicas
HERRAMIENTAS MANUALES		Herramientas para la restauración de los gabinetes

B.5 Elementos de protección del personal

Para el desarrollo de cada tratamiento el personal operativo debe contar con los elementos de seguridad que muestra la Tabla 6.

MANUAL TRATAMIENTO DE RAE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

Tabla 6. Elementos de protección

GUANTES DE SEGURIDAD CONTRA GOLPES Y CORTADURAS	GAFAS DE SEGURIDAD AJUSTABLES	OVEROL DE TRABAJO	BOTAS DE SEGURIDAD PUNTA DE ACERO
			

Para el proceso de trituración del plástico el operario de la maquina debe tener un accesorio de protección de seguridad llamado protector de oídos (Figura), para prevenir daños auditivos por decibeles altos en la máquina trituradora.



Figura 2. Protector auditivo

B.6 Disposición final de cada residuo

La disposición final de cada residuo está establecida en la Tabla 7.

Tabla 7. Disposición final de cada residuo

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	DESTINO FINAL
BBU Y RRU	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	Centro especializado
BATERIAS	Almacenamiento para recolección semanal por parte del centro especializado	Centro especializado
GABINETES	Almacenamiento y reparación para su reingreso	Reingreso

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	DESTINO FINAL
CORAZAS	Trituración del plástico para venta	Venta de plástico triturado
FIBRAS, JUMPERS Y CABLES	Separación de coraza, almacenamiento y reciclaje del núcleo de la fibra y venta del núcleo de los jumpers y cables	Venta de plástico triturado Reciclaje de sílice Venta de cobre y aluminio

- En el contexto de las placas electrónicas presentes en equipos como RRU y BBU, en la actualidad no se dispone de ninguna compañía en Colombia que ofrezca un proceso adecuado de separación de materiales. Por lo tanto, resulta fundamental considerar un almacenamiento y un posterior reciclaje apropiado de estos residuos, con la perspectiva de delegar su gestión a empresas especializadas.
- Las baterías y acumuladores contienen componentes metálicos altamente perjudiciales, como mercurio, cadmio y plomo, que pueden tener un impacto ambiental significativo. La disposición incontrolada de estos desechos puede originar la contaminación de los ecosistemas acuáticos y perturbar la cadena alimentaria. Investigaciones especializadas indican que una sola batería podría contaminar hasta 600.000 litros de agua, lo que enfatiza la imperiosa necesidad de una gestión responsable de los residuos. Según la normativa vigente en Colombia, las baterías se clasifican como residuos peligrosos y deben ser devueltas posconsumo exclusivamente para fines de reciclaje.
- Cuando se aborda la problemática de los paneles eléctricos, es viable que un técnico cualificado pueda realizar reparaciones para reintegrarlos a las instalaciones. Es de crucial importancia garantizar que cualquier labor de reparación sea ejecutada de acuerdo con las directrices establecidas por entidades como la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) o la clasificación de Protección de Ingreso (IP), que establecen estándares de

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

seguridad aplicables a los paneles. Optar por la reparación en lugar de adquirir un nuevo panel podría resultar en ahorros financieros considerables.

- Las corazas remanentes de la instalación son susceptibles de ser recicladas, ya que están principalmente compuestas de plástico. El procedimiento de reciclaje implica la trituración del plástico y su venta para su reutilización en otros procesos de producción. Esta práctica evita la disposición inadecuada de las carcasas y contribuye a la reducción del impacto ambiental causado por los desechos plásticos.
- Los cables pueden ser separados con el propósito de vender o reciclar su núcleo y su revestimiento de plástico. El plástico triturado se convierte en gránulos para la manufactura de diversos objetos, y también se está explorando para nuevas aplicaciones. Las fibras ópticas son reciclables debido a su composición de vidrio. Los cables y conectores contienen metales valiosos como el cobre y el aluminio, que son altamente apreciados en la industria del reciclaje.

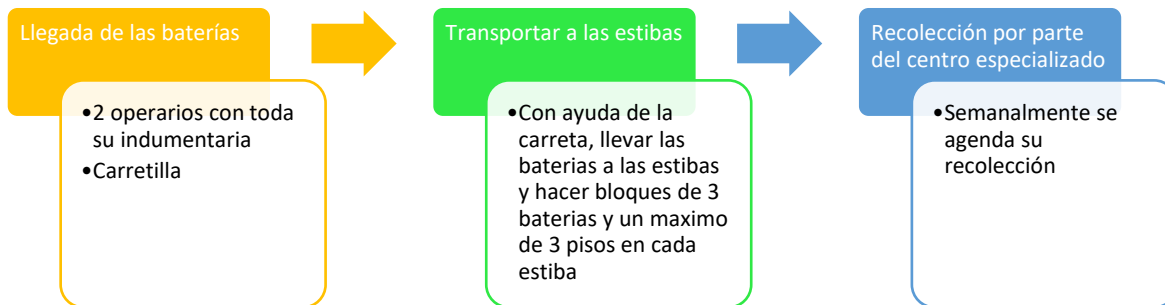
B.7 Proceso del tratamiento de cada residuo

B.7.1 Tratamiento de las placas electrónicas (paso a paso)

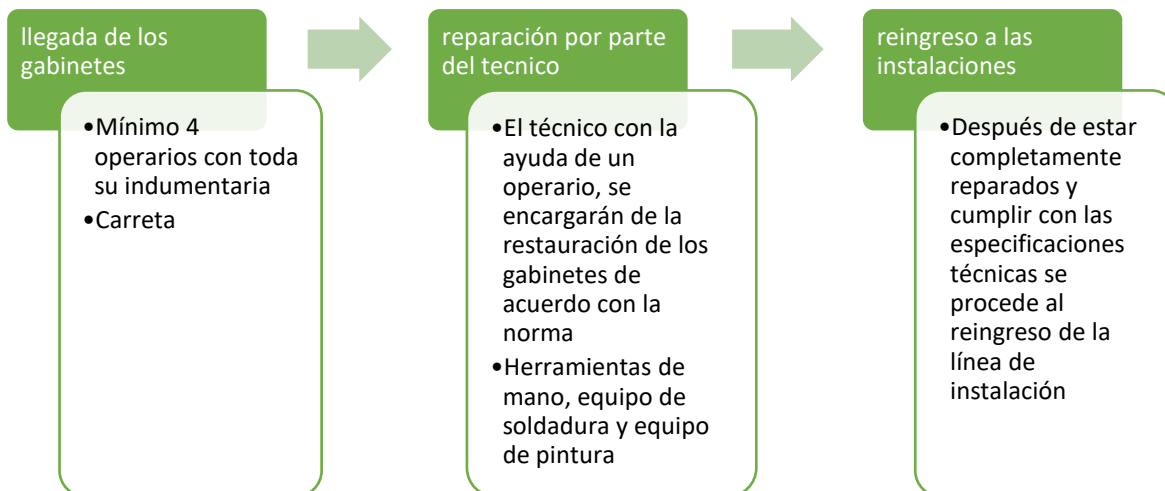


MANUAL TRATAMIENTO DE RAE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

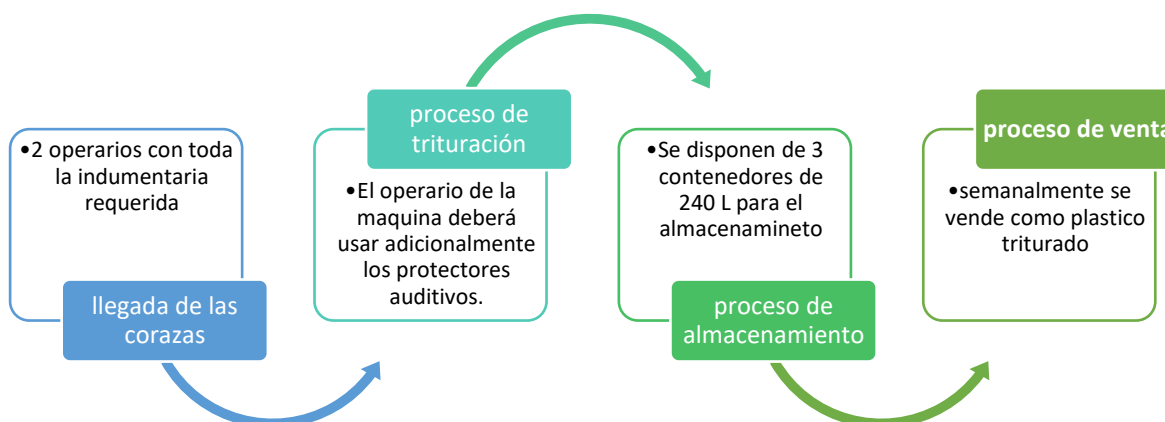
B.7.2 Tratamiento de las baterías (paso a paso)



B.7.3 Tratamiento de los gabinetes (paso a paso)

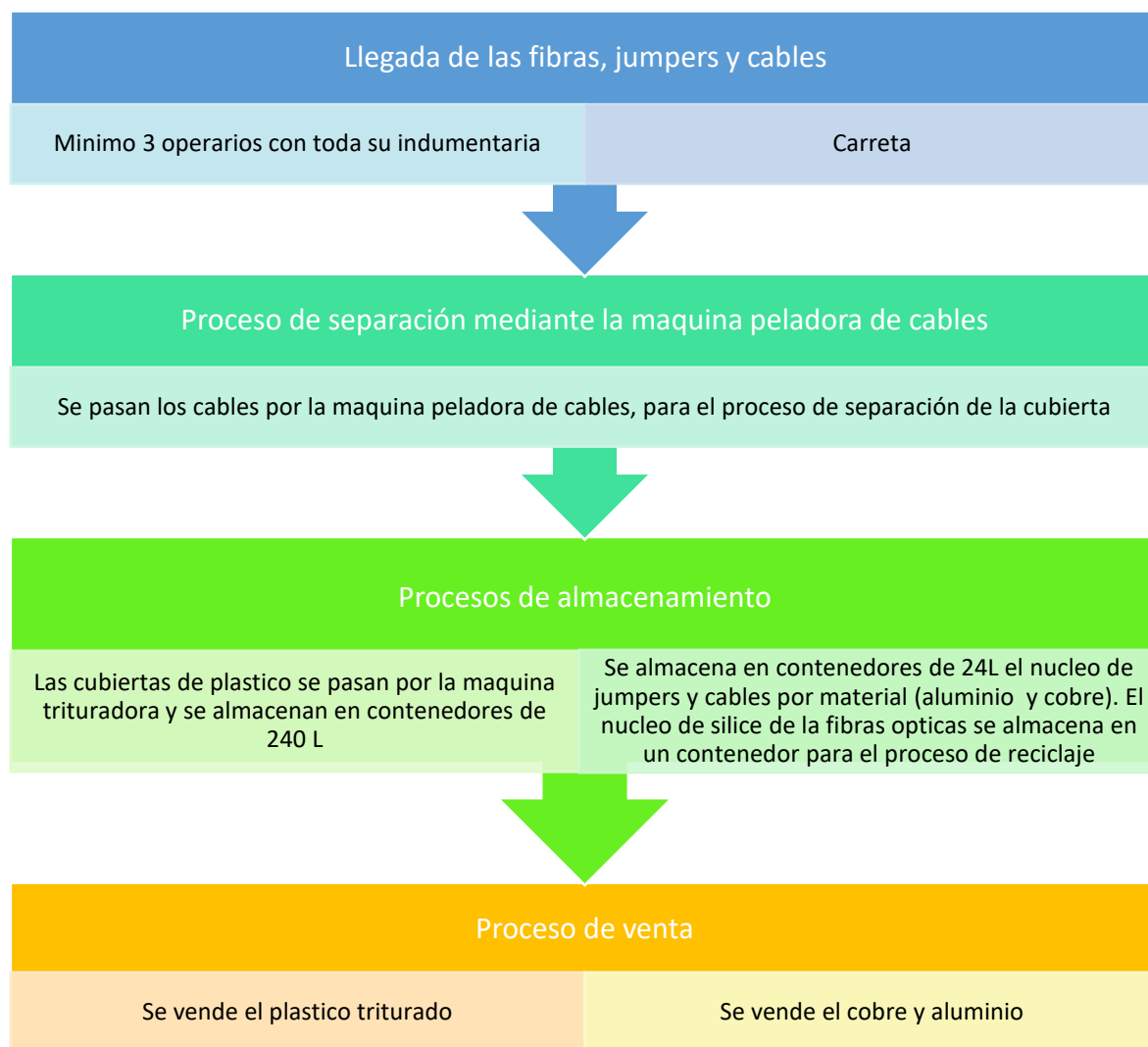


B.7.4 Tratamiento de las corazas (paso a paso)



MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

B.7.5 Tratamiento de las fibras, jumper y cables (paso a paso)



MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2014). Cambio climático y tecnologías de la información y la comunicación.
- [2] Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2018). Informe sobre la medición de la sociedad de la información 2018. Ginebra: UIT.
- [3] Goodship, V., Stevels, A., & Huisman, J. (Eds.). (2019). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. Woodhead Publishing.
- [4] M. Cobbing, Toxic Tech: Not in our backyard, Uncovering the Hidden Flows of e-Waste. 2008, Greenpeace.
- [5] J. Huisman, et al., 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) - Final Report. 2007, Aea Technology United Nations University, Gaiker, Regional Environmental Centre for Central and Eastern Europe, Delft University of Technology, for the European Commission.
- [6] S. Schwarzer, et al., E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use. 2005, Unep.
- [7] Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The global e-waste monitor 2020. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 120.
- [8] Muñoz, R. 2018. El número de líneas móviles supera por primera vez a la población mundial. Los usuarios alcanzaron los 5.000 millones en 2017, pero las tarjetas SIM se elevaron a 7.800 millones. El País.
- [9] Muñoz, A. V., Huamán, H. I. M., Siesquen, J. A. S., Manay, R. M. R., & Calderón, O. M. G. (2022). DESECHOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS: UN DESAFÍO A LA CONCIENCIA AMBIENTAL EN ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS. *Hacedor-AIAPÆC*, 6(2), 122-133.
- [10] Clerc, J., Pereira, A. M., Alfaro, C., & Yunis, C. (2021). Economía circular y valorización de metales: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

MANUAL TRATAMIENTO DE RAEE PARA EMPRESAS DE TELECOMUNICACIONES

- [11] B. Steubing, e-Waste generation in Chile, situation analysis and estimation of actual and future computer waste quantities using material flow analysis. 2007, Federal Institute of Technology (EPFL) / Federal Institute for Material Testing and Research (EMPA): Lausanne / St.Gallen, Switzerland.
- [12] Blaser, Fabián, EMPA (2009). Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia. Diagnóstico de Electrodomésticos y de Aparatos Electrónicos de Consumo. Informe Final, 19 de octubre de 2009.
- [13] Initiative, S. United Nations University.(2014). Solving the E-Waste Problem (Step) White Paper. One Global Definition of E-waste. Ginebra, Suiza: StEP Initiative/United Nations University. Obtenido de [http://www. stepinitiative. org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One% 20Global% 20Definition% 20of, 2.](http://www.stepinitiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One%20Global%20Definition%20of%20of,2)
- [14] Gutiérrez Gallego, J. C. (2015). Estructuración de un modelo de negocio basado en el aprovechamiento de residuos eléctricos y electrónicos (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- [15] Oecd, Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments. 2001, Oecd.
- [16] Ott, D. (2008). Diagnóstico de la Gestión de los Residuos Electrónicos en Colombia. Diagnóstico de computadores y teléfonos celulares Medellín, Colombia, EMPA
- [17] Greenpeace. (Abril de 2011). Basura informática: la otra cara de la tecnología. Buenos Aires: Greenpeace Argentina. Obtenido de http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2011/contaminacion/basura_electronica_otra_cara_tecnologia.pdf
- [18] Cuero Sarria, A., Rivera Castaño, D. P., Riascos Portocarreño, J. I., & Vera Hurtado, Y. (2020). Plan de exportación de desechos electrónicos (celulares) de Buenaventura a China.
- [19] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 2009. Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

REFERENCIAS

- [1] ONU, «Los desechos electrónicos, una oportunidad de oro para el trabajo decente,» Noticias ONU, 17 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2019/04/1455621>. [Último acceso: 08 Septiembre 2023].
- [2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Residuos de Aparato Eléctricos y Electrónicos – RAEE,» minnambiente, 01 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-de-aparato-electricos-y-electronicos-raee/>. [Último acceso: 08 Septiembre 2023].
- [3] C. P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr y J. Huisman, «The global e-waste monitor – 2014,» United Nations University, IAS - SCYCLE, Bonn, Germany, 2015.
- [4] J. García y C. Ceraso, «Charla de sensibilización sobre basura electrónica,» de *Semana Internacional de Acceso Abierto 2022* , Catamarca, 2022.
- [5] K. Peeranart, N. Ravi y H. Ming, «Electronic waste management approaches: An overview,» *Elsevier*, vol. 33, pp. 1237-1250, 2013.
- [6] L. L. Estela, «IMPLEMENTACIÓN DE PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS DE APARATOS ELECTROELECTRÓNICOS (RAEE's) DE LA EMPRESA ALS PERU S.A., 2020,» Universidad Nacional del Callao, Callao, 2021.
- [7] M. Y. T. S. J. L. & T. Q. P.-A. Suárez Serrano, «Causas de la poca recuperación de valor de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Bogotá.,» *Revista De Investigación*, vol. 9, nº 2, pp. 55-68, 2016.

- [8] M. G. Da Silva, «Los RAEEs un nuevo flagelo ambiental y sanitario de la humanidad,» *Universidad Nacional de Luján*, 26 mayo 2016.
- [9] M. Y. T. S. J. L. & T. Q. P.-A. Suárez Serrano, «Causas de la poca recuperación de valor de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Bogotá,» *Revista De Investigación*, pp. 55-68, 2016.
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «POLÍTICA NACIONAL Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos,» Bogotá, 2017.
- [11] Forti V., Baldé C.P., Kuehr R. y Bel G., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.*, Bonn/Geneva/Rotterdam: United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020.
- [12] OECD, «Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management,» OECD Publishing, Paris, 2016.
- [13] R. H. Sampieri, *Metodología de la investigación*, Sexta ed., S. M. Valencia, Ed., Ciudad de México: Mac Graw Hill, 2014, pp. 1-634.
- [14] H. . H. Andrade Sosa, E. d. J. Lince Mercado, A. E. Hernandez Cuadrado y A. . J. Monsalve Quintero, «Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas,» *Revista de Dinámica de Sistemas*, Septiembre 2011.
- [15] P. Arroyo López, M. Villanueva Bringas, J. Gaytán Iniestra y M. García Vargas, «Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos: Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística inversa,» *Contaduría y Administración* 59, 2014.
- [16] C. P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr y J. Huisman, «The Global E-waste Monitor – 2017,» International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), United Nations University (UNU), 2017.

- [17] D. S. Achilias, E. V. Antonakou y E. Koutsokosta, «Management of waste electrical and electronic equipment in Greece: Problems and perspectives,» *Journal of Environmental Management*, vol. 246, pp. 533-542, 2019.
- [18] F. W. I. a. C. T. Ongondo, «How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes.,» *Waste Management*, n.a., 2011.
- [19] N. Abdullah, M. Sulaiman y N. Zakuan, «Electronic waste management and practices in Malaysia,» *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 391-396, 2015.
- [20] A. Gómez-Bernal, E. Ayala-Niño y B. Flores-Rios, «Proposal for a sustainable reverse logistics system for electronic waste in Mexico,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 415-429, 2017.
- [21] T. Figueiredo, A. Lopes y D. do Nascimento, «Reverse logistics of electronic waste: a case study of a Brazilian telecommunications company,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 162, pp. 1346-1354, 2017.
- [22] H. Jung, D. Lee, S. Lee, J. Lee y T. Kim, «A case study of Korea Telecom's recycling system for waste mobile phones,» *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 20, nº 2, pp. 1056-1063, 2018.
- [23] D. Rodríguez-Rodríguez, M. Tejedor-Estrada, A. García-Sánchez y D. Rincón, «Circular economy in the telecommunications sector: A comparative analysis of best practices,» *Sustainability*, vol. 12, nº 22, p. 9441, 2020.
- [24] S. Al-Salem, A. Al-Arfaj, M. Mokhtar y H. Al-Dhafeeri, «Assessment of e-waste management in the Arab countries: Status, challenges and future directions,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 1241-1252, 2019.
- [25] R. Kinyua, J. Njoroge y D. Awange, «Assessment of electronic waste management practices in Kenya: a case study of Nairobi county,» *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, nº 10, pp. 2163-2172, 2018.

- [26] N. Rojas-Valencia, A. Galvis y A. Jaimes, «Análisis de la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en el sector de las TIC en Colombia,» *Revista de Investigación Académica*, vol. 54, 2018.
- [27] L. Díaz, M. Sánchez y L. Tafur, «Análisis de la gestión de residuos eléctricos y electrónicos en el sector hospitalario en Colombia,» *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 33, nº 4, pp. 585-598, 2017.
- [28] J. Olaya-Rodríguez, F. Contreras-Santos y M. Romero-Barrera, «hallenges for electronic waste management in Bogotá: A case study,» *Waste Management & Research*, vol. 37, pp. 83-89, 2019.
- [29] M. Ali, M. Islam, M. Islam y M. Hossain, «Management of e-waste: A review of global approaches and challenges,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 141, pp. 488-498, 2019.
- [30] P. Agamuthu, L. Yazan y C. Visvanathan, «E-waste: a growing concern in today's environment,» *Recycling*, vol. 1, nº 1, pp. 34-46, 2013.
- [31] M. Rama, P. Singh, R. Gupta y R. Yadav, «An integrated model of e-waste management for telecommunications industry,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1213-1225, 2016.
- [32] X. Liu, T. Feng, Q. Zhu y M. Zhang, «The impact of e-waste management on the supply chain: a case study of telecom products in China.,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 150, pp. 152-160, 2017.
- [33] K. López-Vargas, J. Robles-Morales y P. Durango-Cohen, «Dinámica de sistemas aplicada al análisis de la gestión de residuos sólidos urbanos en Colombia,» *Revista de Ingeniería*, vol. 52, pp. 56-65, 2020.

- [34] F. Barraza, L. Aguilar y H. Velasco, «Dinámica de sistemas aplicada a la gestión de residuos peligrosos en México,» *Investigación Administrativa*, vol. 48, nº 124, pp. 42-53, 2019.
- [35] V. De Oliveira, J. Feres y M. Chagas, «Dynamic simulation model of solid waste management in Brazil: policy scenarios for waste reduction,» *Journal of Environmental Management*, vol. 268, p. 110640, 2020.
- [36] PNUMA, Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación, Naciones Unidas, 1989.
- [37] Directiva 2012/19/UE, Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), Unión Europea, 2012.
- [38] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1115, Bogotá D.C.: Gobierno Nacional de Colombia, 2017.
- [39] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1411, Bogotá D.C.: Gobierno Nacional de Colombia, 2017.
- [40] PROFEPA, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Ciudad de México: Gobierno de México, 2003.
- [41] R. Widmer, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann y H. Boni, «Global perspectives on e-waste,» *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25, nº 5, pp. 436-458, 2005.
- [42] A. Molino, P. Benavides y C. Cardona, «Pyrolysis of electronic waste: An overview,» *Journal of analytical and applied pyrolysis*, vol. 111, pp. 149-162, 2015.
- [43] V. Kumar y M. Holuzko, «Acid hydrolysis technology for the recovery of valuable metals from waste electrical and electronic equipment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 595-609, 2018.

- [44] A. Zabaniotou, *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: environmental assessment and management*, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [45] M. Chen, L. Shao, H. Liu, L. Yin, B. Zhang y L. Cai, «Investigation on pyrolysis of waste printed circuit boards for copper recovery,» *Waste Management*, vol. 71, pp. 194-204, 2018.
- [46] L. Ortiz, F. Ruiz y J. Lema, «E-waste management in Colombia: A case study,» de *In Proceedings of the 2019 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2019.
- [47] L. Gutiérrez, M. Morales y C. Orozco, «Análisis de la gestión de residuos electrónicos en Colombia,» *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 54, nº 2, pp. 9-22, 2020.
- [48] Alcaldía Mayor de Bogotá, «Recolección de residuos especiales,» 2020. [En línea]. Available: Recolección de residuos especiales. [Último acceso: 05 Marzo 2023].
- [49] Secretaría Distrital de Ambiente, «Reciclar es Bueno,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ambientebogota.gov.co/web/guest/reciclar-es-bueno>. [Último acceso: 05 Marzo 2023].
- [50] P. González-Torre, B. Adenso-Díaz y M. Albareda-Sambola, «Environmental management systems in SMEs: an exploratory study in the Spanish context,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, pp. 358-374, 2015.
- [51] E. Ertörer, H. İnan y Ö. Arslan, «Analysis of electronic waste recycling processes: a sustainable option for resource recovery,» *Environmental science and pollution research international*, vol. 25, nº 26, pp. 26189-26199, 2018.
- [52] ECOTIC, «COMPENSACIÓN ECONÓMICA ECOTIC 2022,» Eco, Bogotá, Colombia, 2022.

- [53] Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, «Real Decreto 110,» de *Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*, Madrid, España, Gobierno de España, 2015, 20 de Febrero, pp. 14211-14312.
- [54] Parlamento Andino, «residuos electronicos.net,» Marzo 2011. [En línea]. Available: <http://www.residuoselectronicos.net/documents/110410-documento-lineamientos-para-la-gestion-de-raee-en-la-mesa-de-trabajo-publico-privada.pdf>. [Último acceso: 13 Febrero 2023].
- [55] PREAL, «Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en Uruguay Cantidades generadas y flujos,» GEF, Epub, 2020.
- [56] J. H. Ávila-Toscano, I. Romero Pérez, E. Saavedra Guajardo y A. Marengo-Escuderos, «Influencia de la producción de nuevo conocimiento y tesis de postgrado en la categorización de los grupos de investigación en Ciencias Sociales: árbol de decisiones aplicado al modelo científico colombiano,» *Revista Española de Documentación Científica*, Barranquilla, Colombia, 2018.
- [57] M. Castro Pérez y M. E. Morales Ramírez, «Los ambientes de aula que promueven el aprendizaje, desde la perspectiva de los niños y niñas escolares,» *Revista Electrónica Educare*, vol. 19, nº 3, pp. 1 - 32, 2015.
- [58] C. Correa, «Informe de Rendición de Cuentas,» *Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, vol. 1, nº 1, pp. 1 - 257, 2022.
- [59] Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente,» Gobierno Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2019.
- [60] P. González-Torres, B. Adenso-Díaz y M. Escobar-Tello, «An overview of the potential of life cycle thinking in integrated solid waste management: Part I: general concepts,» *Waste management*, vol. 32, nº 12, pp. 2197-2208, 2012.

- [61] S. Dhingra y A. Panwar, «E-waste management: A review of the state-of-the-art,» *Journal of environmental management*, vol. 232, pp. 1-22, 2019.
- [62] United Nations Environment Programme (UNEP), «Global E-waste Monitor 2020,» Naciones Unidas, 2020. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/eWaste/Global-E-waste-Monitor-2020.pdf>.
- [63] C. Tukker, «Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transitions,» 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/296539098_Towards_a_circular_economy_Business_rationale_for_an_accelerated_transition..
- [64] R. Rajamohan, «Extended Producer Responsibility and E-waste Management in India,» *IUP Journal of Supply Chain Management*, vol. XIII, nº 1, pp. 7-21, 2016.
- [65] ISO, «ISO 14001:2015 Environmental management systems -- Requirements with guidance for use,» 2015.
- [66] Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» un.org, 24 Mayo 2022. [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=obj+etivos+de+desarrollo+sostenible&sxsrf=AJOqlzXWlpKdGUM0T87G5SUT8qMc_ktO8w%3A1676309400596&ei=mHPqY9-LJIOWwbkPiL-emAg&oq=obj+etivos+de+desar&gs_lcp=Cgxnd3Mtd2l6LXNlcnAQAxgAMgQIlxAnMgUIABCABDIFCAAQgAQyCwgAEIAEELEDEIMBMgUIABC. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [67] D. Escobar, A. López, A. Camacho y E. Camelo, «Política nacional para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE),» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá D.C., 2017.
- [68] D. K. B. Paniagua, A. H. Granados, E. B. D. Cruz, K. G. C. Villavicencio y H. M. Valencia, «RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE):

IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL, GESTIÓN Y METODOLOGÍAS SOBRE SU MANEJO,» *enerLAC*, pp. 108-131, 2020.

- [69] LIPPEL, «Descubre cómo se realiza el reciclaje de placas electrónicas,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.lippel.com.br/noticias/descubre-como-se-realiza-el-reciclaje-de-placas-electronicas/?lng=es>. [Último acceso: 13 04 2023].
- [70] RECYTRANS, soluciones globales para el reciclaje, «RECICLAJE DE PILAS,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.recytrans.com/blog/reciclaje-de-pilas/>. [Último acceso: 2023].
- [71] nvent hoffman, «NEMA Vs IP en gabinetes eléctricos ¿Cuál es la diferencia?,» 18 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://hoffman-latam.com/blog/nema-vs-ip/>. [Último acceso: abril 2023].
- [72] RECYTRANS, «TRITURACIÓN DE PLASTICO,» RECYTRANS, 2015 05 15. [En línea]. Available: <https://www.recytrans.com/blog/trituracion-de-plastico/>. [Último acceso: 20 04 2023].
- [73] FENIXCOL, «Contenedor de Basura 1100 litros,» FENIXCOL, 2022. [En línea]. Available: https://www.fenixcol.com.co/producto/contenedor-de-basura-1100-litros-polipropileno/?attribute_pa_color=verde&utm_source=Google+Shopping&utm_medium=cpc&utm_campaign=Fenixcol+feed+shopping+&gclid=Cj0KCQjwxYOiBhC9ARIsANiElfZ25g_VI_MNKokdtIPFSscjSXeeL-otteXt. [Último acceso: 20 04 2023].
- [74] MERCADO LIBRE , «Carretilla Zorra De Carga 200 Kg,» 2023. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-614540172-carretilla-zorra-de-carga-200-kg-_JM?matt_tool=70147493&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14633851809&matt_ad_group_id=122277564930&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative. [Último acceso: 20 04 2023].
- [75] HOMECENTER, «HOMCENTER.COM,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/399998/estiba-plastica-er->

1012c-para-uso-solo-en-piso-100x120x15cm-set-x10-unidades/399998/?kid=goosho_1161562&shop=googleShopping&gclid=CjwKCAjw6liiBhAOEiwALNqncdMj1G7TT5oh5TSRRFkTF86-kD8Fz7Ox9TMW2a03M. [Último acceso: 2023].

[76] Asian machinery usa, «trituradora de plastico,» 2023. [En línea]. Available: <https://asianmachineryusa.com/Reciclado-de-plasticos/Trituradores/De-Un-solo-Eje/VMWT2260>.

[77] ESTRA, «Contenedor Forte + 240L,» 2021. [En línea]. Available: https://www.estra.com/contenedor-forte---240l-444/p?idsku=475&gclid=CjwKCAjw6liiBhAOEiwALNqncXTSJG-XYtPta_NV7AncfDROyGbXK_pz3nryegs2XNiYruJUxl-JwRoCi1MQAvD_BwE.

[78] RAEE Colombia, «Reciclaje electrónico,» 2023. [En línea]. Available: <https://raeecolombia.com/>. [Último acceso: 2023].

[79] J. E. Calpa-Oliva, «Validación de un modelo de logística inversa para la recuperación de los RAEE de la ciudad de Cali, basado en el Pensamiento Sistémico usando una simulación con Dinámica de Sistemas,» *Tecnológicas*, vol. 23, nº 48, pp. 55-81, 2020.

[80] Ministerio del Medio Ambiente, 15 junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-integral-de-residuos-de-aparatos-electricos-y-electronicos-raee>.

[81] Alcaldía de Envigado , CORANTIOQUIA, ENVIASEO y eCycling, «Concientízate: Campaña de recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos,» Impresos Begón, Medellín , 2020.

[82] C. Baldé , V. Forti , V. Gray, R. Kuehr y P. Stegmann,, Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2017, U. I. d. T. (. y. A. I. d. R. S. (. Universidad de las Naciones Unidas (UNU), Ed., Bonn/Ginebra/Viena, 2017.

- [83] S. Mendéz Fajardo, H. Böni, C. Hernández, M. Schluep y S. Valdivia, «Guía práctica para el diseño sistémico de políticas para la gestión de RAEE en países en vía de desarrollo,» Sustainable Recycling Industries , St. Gallen, Suiza , 2017.
- [84] U. Silva, D. Ott y H. Boeni, «E-waste recycling in Latin America: overview, challenges and potential,» de *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, Cancún, México, 2008.
- [85] L. Uribe, S. Rodríguez, C. Hernández y D. Ott, «Manejo de los RAEE a través del Sector Informal en Bogotá, Cali y Barranquilla,» ewaste, Bogotá, Colombia, 2010.
- [86] G. Bedoya, C. Camacho, N. Castaño y T. Cruz, «Economía circular como estrategia de responsabilidad social empresarial en Bogotá y zona de influencia, desde la lectura del marketing,» Fundación Universitaria Panamericana, Bogotá D.C., 2019.
- [87] J. A. García, «Recuperación de metales preciosos en desechos electrónicos,» *Environmental Science and Technology*, 2018.
- [88] C. M. O. Ospina, «Estudio de prefactibilidad técnica y económica para el montaje de una planta de reciclaje de residuos electrónicos en Colombia,» 2018.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de los metales pesados en el cuerpo humano.	12
Figura 2. Efectos de la problemática RAEE	13
Figura 3. Causas de la problemática RAEE	14
Figura 4. Gestión de los RAEE en Colombia	15
Figura 5. Diagrama de proceso de la ejecución del proyecto	22
Figura 6. Generación de RAEE por año a nivel global	33
Figura 7. Desechos electrónicos generados vs. Desechos electrónicos documentados para ser recogidos y reciclados adecuadamente por continente	33
Figura 8. Diagrama de flujo de los RAEE	46
Figura 9. Flujo de BBU y RRU semanal	52
Figura 10. Contenedor industrial 1100 L	53
Figura 11. Carretilla Zorra De Carga 200 Kg	53
Figura 12. Elementos de seguridad	54
Figura 13. Estiba plástica	55
Figura 16. Tratamiento de las corazas	56
Figura 14. Maquina trituradora de plástico	57
Figura 15. Contenedor de 240 L	57
Figura 17. Maquina peladora de cables	58
Figura 18. Relación entre las ventas de RAEE y la demanda de este	62
Figura 19. Diagrama de Forrester	63
Figura 20. Viabilidad del proceso establecido	66

LISTA DE TABLA

Tabla 1. Variables establecidas para el desarrollo del proyecto.....	18
Tabla 2. Metodologías para toma de decisiones	26
Tabla 3. Marco Legal	36
Tabla 4. Tratamiento de RAEE	40
Tabla 5. Contexto de empresa piloto	41
Tabla 6. Tipos de residuos.....	42
Tabla 7. Muestreo de los residuos	43
Tabla 8. Cantidad de residuos por Instalaciones promedios	44
Tabla 9. Proceso de tratamiento para la empresa.....	59
Tabla 10. Valor del Centro Especializado	61
Tabla 11. Costos, beneficios e inversión.....	64