

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Industrial

Modelo de planeación y programación de la producción para el desensamblaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Caso de estudio: Cantón Cuenca – Ecuador

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

Autor:

Fabián Jacob Álvarez Tello

Director:

Paola Fernanda Vintimilla Álvarez

ORCID:  0000-0002-8194-6054

Cuenca, Ecuador

2023 – 03 – 15

Resumen

El modelo propuesto maximiza los ingresos del procesamiento de RAEE, para esto el modelo se basa en programación lineal estocástica debido a la variabilidad de algunos de los parámetros: las llegadas esperadas de RAEE en el siguiente período, la cantidad de subproductos obtenidos y el tiempo de procesamiento de cada RAEE teniendo en cuenta el método de procesamiento utilizado. Así el modelo propuesto identifica la cantidad de cada RAEE que debe ser procesada, eligiendo el método por el cual debe procesarse y el número de recursos necesarios. El modelo es multiperíodo debido al constante flujo de nuevos RAEE. El modelo se realiza con variables de recursos como el stock de entradas, stocks de subproductos, venta esperada de subproductos en cada período y la cantidad de demanda que no pudo ser alcanzada. Para la solución del modelo ha sido utilizado el software de optimización LINGO. Asimismo, el modelo propone un método de programación basado en reglas de prioridad, seleccionadas en base al nivel de toxicidad. En cada período primero se procesan los RAEE que requieren desmontaje, después los que requieren un pequeño procesamiento, entre estos se selecciona el producto que contiene subproductos más tóxicos.

Los datos del modelo fueron recolectados por el proyecto Gestión Responsable y Sostenible de Residuos Electrónicos en Cuenca/Ecuador (ResCue). El modelo fue validado por simulación, mediante el software Flexsim. Los resultados obtenidos no muestran diferencias significativas para las variables analizadas, por lo que el modelo propuesto es válido para planificar y programar el tratamiento de los RAEE.

Palabras clave: RAEE, planeación, programación, simulación, proceso estocástico

Abstract

The model proposed maximizes the income from WEEE processing, the model was based on stochastic linear programming due to the variability of some of the parameters: the expected arrivals of WEEE in the following period, the amount of by-products obtained and the processing time of each WEEE taking into account the processing method used. Thus, the proposed model identifies the quantity of each WEEE that must be processed, choosing the method by which it must be processed and the number of resources needed. The model is multi-period due to the constant flow of new WEEE. The model is carried out with resource variables such as the input stock and by-product stocks and the expected sale of by-products in each period and the amount of demand that could not be reached. For the solution of the model, the LINGO optimization software has been used. Likewise, the model proposes a programming method based on priority rules, these rules were selected based on the level of toxicity. In each period, first the WEEE that requires disassembly is processed, then those that require a little processing, among these the product that contains the most toxic by-products is selected.

The data of the model was recollected by the project Responsible and Sustainable E-waste Management in Cuenca/Ecuador (ResCue). The model was validated by simulation, through Flexsim software. All model information was entered into the Flexsim software. The results obtained do not show different values for the variables analyzed, so the proposed model is valid for planning and programming the treatment of WEEE.

Keywords: WEEE, planning, scheduling, simulation, stochastic process

Índice de contenidos

Resumen	2
Abstract	3
Agradecimientos	8
1. Introducción	9
2. Materiales y Método	14
2.1. Definición del método de modelado.	14
2.2. Suposiciones de modelado.	16
2.3. Identificación de parámetros y variables de decisión.	17
2.4. Construcción de árbol de escenarios.	18
2.5. Construcción del Modelo.	18
2.6. Recopilación de datos.	18
2.7. Resolución del modelo propuesto.	19
2.8. Identificación de reglas de prioridad.	19
2.9. Escenarios de simulación.	20
2.10. Suposiciones de la simulación y parametrización.	21
2.11. Recopilación de Resultados	22
2.12. Pruebas de hipótesis.	23
2.13. Generación de escenarios y presentación de Resultados	24
3. Resultados y Discusión	25
3.1. Modelo de programación lineal estocástica.....	25
3.2. Listado de prioridad de procesamiento para cada RAEE	30
3.3. Simulaciones en Flexsim de distintos escenarios	31
3.4. Validación del modelo	32
3.5. Plan Maestro de Producción.....	34
4. Conclusiones	37
Referencias	38
Anexos	41
Anexo A: Parámetros y variables del modelo	41

Anexo B: Árbol de decisiones	44
Anexo C: Datos Actuales del centro de procesamiento de RAEE en el cantón Cuenca ..	45
Anexo D: Mix de procesamiento para simulación de cada escenario	53
Anexo E: Resultados obtenidos de cada Simulación.....	55
Anexo F: Datos iniciales de los escenarios correspondientes a cada mes	65

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Esquema Metodológico.....</i>	14
Figura 2	<i>Proceso de decisión en la programación lineal estocástica</i>	15
Figura 3	<i>Layout de la planta de procesamiento de RAEE</i>	21
Figura 4	<i>Ejemplo del Dashboard utilizado para recolectar los datos. Ejemplo del Escenario</i>	
5	<i>.....</i>	22

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Nivel de Toxicidad de los distintos tipos de RAEE</i>	20
Tabla 2	<i>Unidades de RAEE que deben ser procesados en el primer mes según los datos del Anexo C.</i>	28
Tabla 3	<i>Recursos Necesarios para el primer mes de producción según los datos del Anexo C.</i>	29
Tabla 4	<i>Lista de prioridad de procesamiento según las reglas de prioridad establecidas.</i>	30
Tabla 5	<i>Resultados económicos del primer escenario de las evaluaciones del modelo y de las simulaciones en Flexsim</i>	31
Tabla 6	<i>Resultados de la prueba F de la comparación de las muestras de Lingo Óptimo, con cada uno de los escenarios simulados.</i>	32
Tabla 7	<i>Resultados de la prueba T de la comparación de las muestras de Lingo Óptimo, con cada uno de los escenarios simulados.</i>	33
Tabla 8	<i>Media muestral de los resultados económicos para el primer mes de procesamiento, en los distintos escenarios.</i>	33
Tabla 9	<i>Mejora porcentual que representa procesar las cantidades de LINGO, frente a cada escenario aleatorio.</i>	34
Tabla 10	<i>Programa Maestro de Producción para obtener tarjetas de Circuito Impreso.</i>	35
Tabla 11	<i>Programa Maestro de Producción para obtener Acero inoxidable.</i>	36

Agradecimientos

Una vez finalizada la presente investigación, quiero dedicar un agradecimiento a mi tutora de tesis, Ing. Paola Vintimilla, por la guía en este camino de aprendizaje y generación de conocimiento.

Del mismo modo extiendo mi gratitud al proyecto Res-Cue, perteneciente al Grupo de Investigación de Economía Circular Inclusiva, el cual me abrió las puertas para realizar la presente investigación y ha sido un apoyo en el proceso de realización de la misma. Finalmente, extiendo mi agradecimiento a la empresa pública EMAC que ha generado el interés y apertura a la investigación en el campo de la Economía Circular

1. Introducción

La tasa de crecimiento de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos es de entre el 3 al 5% anual, principalmente debido al corto período de vida útil de estos aparatos (Ilankoon et al., 2018). El estudio de Murthy & Ramakrishna (2022) ha demostrado que la generación de RAEE per cápita es de 7.6 kg/año, por lo cual al final del 2021 han sido generados 57.4 millones de toneladas métricas en el mundo. Estas cifras demuestran la seriedad del problema de acumulación de RAEE que vive la sociedad.

En el año 2016, Latinoamérica ha generado aproximadamente 4.7 millones de toneladas métrica, lo equivalente al 10% mundial. El problema, en esta zona, se acrecienta debido a la falta de legislación y control de los procesos de gestión (Baldé et al., 2017). En Ecuador la falta de control se puede evidenciar por medio de datos del INEC (2019) que indican que el 77.8% de RAEE ha sido depositado junto con la basura común, el 3.24% han sido quemados y tan solo el 8% ha sido depositado en un centro de acopio o contenedor específicamente destinado al tratamiento de RAEE.

Actualmente, Ecuador ha buscado mejorar la gestión y procesamiento de estos residuos, por tal motivo el 6 de julio de 2021 ha sido aprobada la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva. Dicha ley, con respecto al tratamiento de RAEE, ha pretendido fomentar el reciclaje como parte de la cadena productiva (Asamblea Nacional de La República del Ecuador, 2021). Además, se han desarrollado proyectos de investigación como *Responsible and Sustainable E-waste Management in Cuenca/Ecuador* (ResCue), el cual busca el diseño e implementación de un centro de reparación, reacondicionamiento y reciclaje de desechos electrónicos para el cantón Cuenca.

En el cantón Cuenca, la gestión de RAEE no ha sido acompañada adecuadamente por la ciudadanía, por ejemplo en el año 2020 fueron recolectadas 4,14 toneladas de RAEE, lo cual ha representado alrededor de un tercio de lo que se había recolectado en 2019, y tan solo el 17.4% continuó el proceso de tratamiento (Mercurio, 2021). Por lo tanto, es evidente que existe una brecha entre lo que se ha recolectado y lo que efectivamente se ha gestionado.

La EMAC, empresa pública a cargo de la gestión de residuos en el cantón Cuenca, en su rendición de cuentas del año 2021, ha manifestado su férreo compromiso con la gestión de RAEE. Así, la EMAC junto con el proyecto ResCue se han planteado como objetivo la creación de un sistema integrado y sostenible de gestión de RAEE, el cual al finalizar el año 2021 ha tenido un avance del 84.8% (EMAC, 2021).

Actualmente, la EMAC cuenta con el espacio físico necesario para la ejecución de las actividades de gestión de RAEE, el mismo se encuentra ubicado en el Ecoparque “El Valle”.

Actualmente se ha realizado se ha diseñado la distribución de planta adecuada para el procesamiento de RAEE. El siguiente paso para poder iniciar las actividades en esta planta es la creación de un modelo de planeación y programación de desensamblaje de RAEE.

El principal objetivo de un modelo de planeación y programación se basa en la optimización de recursos, la maximización de beneficios o la minimización de los costos (Ramón, 1992). Además de la necesidad económica del proyecto para subsistir, debe priorizarse el tratamiento de aquellos residuos que son considerados de mayor riesgo. Siendo así el modelo de planeación y programación debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Satisfacer la demanda mínima para conseguir los mayores ingresos posibles.
- Mantener niveles de stock adecuados, tanto para los RAEE a la entrada como para los subproductos obtenidos, para no exceder la capacidad de la planta.
- No exceder la capacidad de los diferentes recursos de la planta en el período de análisis.
- Establecer el número de recursos óptimos para realizar las operaciones.
- Establecer la cantidad óptima de RAEE que será desensamblado, que optimice el flujo de materiales.
- Los RAEE más contaminantes deben ser priorizados.

En los últimos años, numerosos modelos han sido desarrollados para satisfacer algunas o todas estas condiciones. Estos distintos modelos se presentan en orden cronológico. Destacando principalmente las características del modelo y las variables que intervienen en el mismo.

La investigación de Abu Bakar & Rahimifard (2008) ha encontrado una solución de planificación, basada en el beneficio económico y en el cumplimiento legislativo europeo. Así esta investigación ha presentado un sistema de planificación del proceso de reciclaje asistido por computador, basado en un marco integrado de planificación del reciclaje de RAEE. Este sistema ofrece como resultado un plan de desensamblaje para un producto específico. Los factores que han sido tomados en cuenta para la decisión de procesamiento son: impacto ambiental, cumplimiento legislativo, competencia en el mercado, complejidad del diseño del producto y composición de materiales. Por lo tanto, el principal objetivo de este modelo es la disminución del impacto ambiental, con costos relativamente razonables.

Yeh & Xu (2013) han realizado un modelo según lógica difusa para la toma de decisiones multicriterio, siendo éstos: Económicos, tanto directos como indirectos; Ambientales como la reducción en botaderos, la innovación en tecnología verde y el cumplimiento de regulaciones; Sociales como la salud y seguridad en el trabajo, aceptación pública y la reputación

corporativa. Para cada criterio ha sido propuesto un peso diferente, según las políticas de la empresa que lo aplique. El modelo abarca las principales actividades del proceso de reciclaje: recolección y transporte, separación y desensamble, tratamiento y finalmente disposición y/o venta.

Xia et al. (2014) ha propuesto un modelo basado en Q-Learning, el mismo que evita el desensamble completo de los RAEE, reemplazándolo por el desensamble selectivo. Este tipo de desensamble se basa en separar solo algunos componentes que serán seleccionados, según criterios económicos y legislativos. El modelo finalmente ha sido integrado como un servicio en la nube para la gestión de RAEE.

El estudio de Xia et al. (2015) ha reconocido la importancia de la planificación del desensamble para un tratamiento eficaz, con una mayor tasa de recuperación y una reducción significativa del daño ambiental. En este sentido, la investigación realizada ha propuesto un enfoque basado en la nube para la planificación del desensamble. Este sistema permite modelar, evaluar y optimizar el desensamble de RAEE.

Capraz et al. (2015) ha presentado un modelo de programación lineal entera mixta, el cual permite determinar el precio máximo de la oferta y al mismo tiempo determina las mejores estrategias de planificación de operaciones. El modelo ha permitido conocer la cantidad de cada RAEE que debe ser procesada en cada actividad, la cantidad de subproductos obtenidos, el tiempo necesario de operación, ingresos por ventas, precio máximo de la oferta, los costos de tratamiento, el apoyo total del gobierno por tratamiento de RAEE y materiales peligrosos.

Liu & Zhang (2018) han desarrollado un modelo para el proceso de desmontaje de un solo artículo, en diferentes períodos, con rendimientos y demandas aleatorias. Este modelo ha hecho uso de programación no lineal entera mixta, en el cual se introduce una restricción de probabilidad para cumplir la demanda con el nivel de servicio deseado. Para la solución del modelo los autores han usado un algoritmo de aproximación a programación entera.

Polat et al. (2018) han presentado un modelo de programación lineal determinista en el que se reconoce la aleatoriedad de algunas variables. El modelo ha sido solucionado, teniendo en cuenta la variabilidad, por medio de lógica difusa de tipo triangular, en la que se inserta el valor mínimo, probable y el máximo. El planteamiento de este modelo se basa principalmente en la maximización, del beneficio total del centro de desensamble. El análisis de los resultados indica que los parámetros difusos generan importantes cambios en los costos totales.

Kapukaya et al. (2019) han propuesto un modelo definido como: bi-objetivo, multi producto y multi período para la planificación de las operaciones en un centro de tratamiento de RAEE. El objetivo de este modelo es la minimización de costos tanto de las actividades de reciclaje, logísticas, además de maximizar la recolección de materiales peligrosos. El modelo decide la recolección de productos en cada región, horas-máquina necesarias, niveles adecuados de inventario y mano de obra necesaria.

Bo et al. (2019) han desarrollado un modelo para optimizar la red de recuperación de RAEE que está asociada con los precios de reciclaje y los subsidios del gobierno. Este se basa en programación entera mixta no lineal, para la realización de este modelo, previamente se recolectó la información de todos los lugares que se involucran en el proceso de tratamiento de RAEE. Para la resolución del modelo, ha sido desarrollado un algoritmo basado en el método de ramificación y acotación. Al finalizar este estudio, los autores destacan la importancia de aumentar las cantidades recicladas, por medio de la concientización social.

Budak (2020) ha propuesto un modelo basado en la administración de la cadena de suministro, en el cual se integra la planeación del desensamblaje de RAEE. Este es un modelo de programación no lineal entera mixta, que como resultados ofrece la cantidad óptima de RAEE entre localidades y niveles de inventario adecuado, el número de estaciones de trabajo, el número de locaciones que deben abrirse y finalmente la cantidad óptima de trabajo que debe ser asignada a cada estación.

Khakbaz (2022) ha realizado un modelo de optimización de la planificación del desensamblaje para actividades de fabricación y remanufactura, utilizando estrategias de sustitución bidireccional. El modelo toma en cuenta las características estocásticas de la calidad de los artículos devueltos. El modelo bidireccional permite a los clientes intercambiar productos nuevos por remanufacturados y viceversa.

Hasta este momento, han sido abordados distintos modelos de planeación del desensamblaje de RAEE. El problema del estudio planteado incluye también la programación del desensamblaje de dichos residuos, por tal motivo se han recopilado investigaciones realizadas con respecto a esta temática. Es importante reconocer que la bibliografía actual es escasa, puesto que la programación es considerada en algunos casos como sin influencia a largo plazo y basada en decisiones diarias (Souza, 2013).

Brander & Forsberg, (2005) han presentado un modelo para la programación del desensamblaje de varios artículos en una sola instalación. El modelo desarrolla una heurística de programación de lotes cíclicos con distintas secuencias, así se obtiene una frecuencia de desmontaje cíclica para cada artículo.

Tanimizu et al. (2017) han propuesto un método de programación para actividades de desmontaje y para actividades de post procesamiento. El algoritmo propuesto modifica tanto las operaciones de desmontaje y post procesamiento, como la secuencia en que son cargados los elementos en las máquinas. El método propuesto se comparó finalmente con métodos heurísticos conocidos como: Aleatorio, FIFO, menor tiempo de procesamiento, menor trabajo restante y mayor trabajo restante.

Jin et al. (2019) han planteado un modelo sistemático para el desensamblaje selectivo de RAEE, principalmente las reglas se basan en el beneficio obtenido, en las directivas de RAEE y la restricción de sustancias peligrosas. El modelo genera todas las posibilidades de secuencia posible y las evalúa. El modelo es validado por medio del caso de pantallas de cristal líquido.

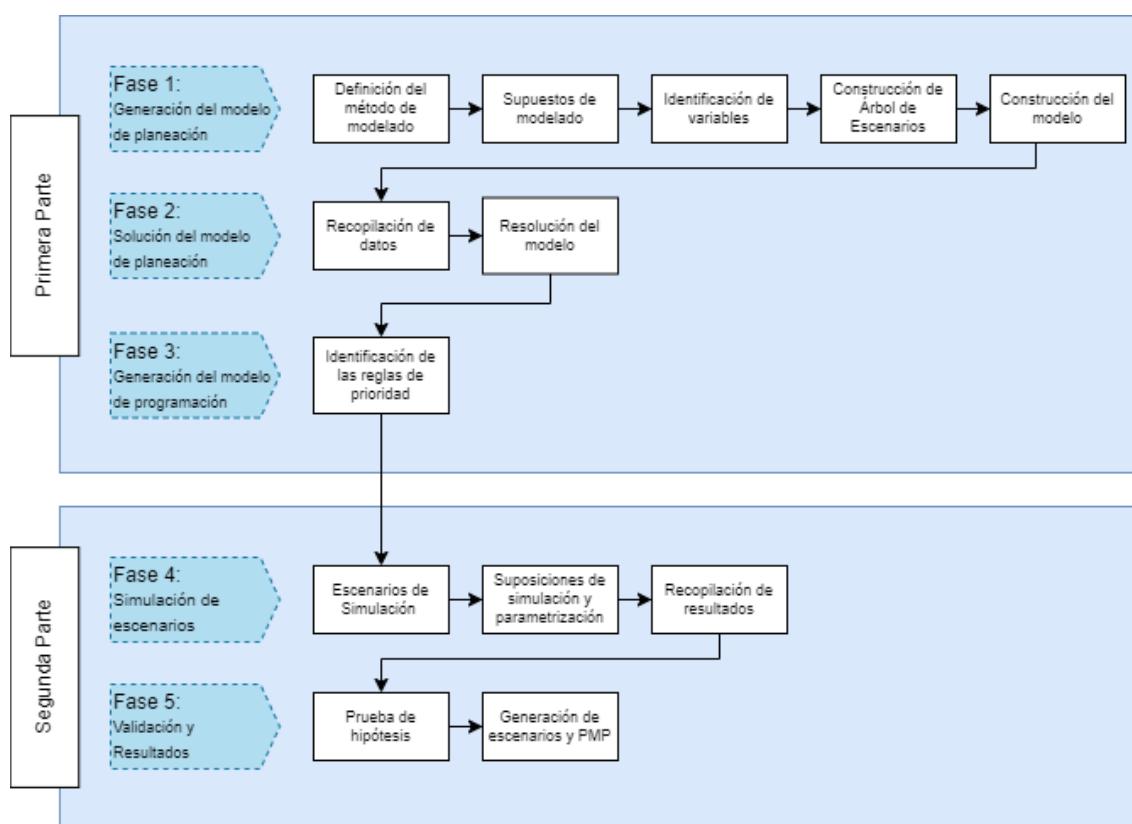
El estado de arte de la planeación y programación del desensamblaje de RAEE contiene importante información, la cual es el punto de partida para el modelo propuesto. El principal objetivo de la presente investigación es diseñar un modelo de planeación y programación del desensamblaje de RAEE que satisfaga las necesidades de gestión de estos residuos en la planta del cantón Cuenca. Para alcanzar el mismo se plantean 3 objetivos específicos, el primero es diseñar el plan maestro del desensamblaje de RAEE, basado en programación lineal estocástica, considerando los diferentes aspectos de la gestión de RAEE en el cantón Cuenca. El segundo consiste en plantear diferentes escenarios de programación del desensamblaje, los cuales podrán aplicarse en el plan maestro a fin de satisfacer las necesidades de la gestión de RAEE. El tercer objetivo es simular el modelo de planeación y programación del desensamblaje de RAEE, mediante la simulación de eventos discretos con el software Flexsim.

2. Materiales y Método

Los objetivos de la investigación serán alcanzados siguiendo una metodología propositiva. En la primera parte se ha desarrollado un modelo matemático, basado en programación lineal estocástica, para la planeación del desensamblaje de RAEE, por otro lado, para la programación del desensamblaje se propondrá las reglas de prioridad, basado en los niveles de toxicidad de los distintos RAEE. En la segunda parte se ha simulado en Flexsim el escenario óptimo ofrecido por el software LINGO y otros escenarios aleatorios que satisfacen las restricciones del problema. Los resultados son validados por medio de prueba T de hipótesis para dos muestras. En la Figura 1, se detalla el proceso metodológico que sigue la investigación.

Figura 1.

Esquema Metodológico



Fuente: Elaboración propia

2.1. Definición del método de modelado.

El problema planteado exige la maximización del beneficio total obtenido del procesamiento de RAEE, por lo cual es necesario optar por un método de optimización. En el mismo se verifica que existe un crecimiento y descenso lineal tanto en los ingresos como en los costos,

por tal motivo basado en Hillier (2010) se ha considerado el uso de un método de programación lineal.

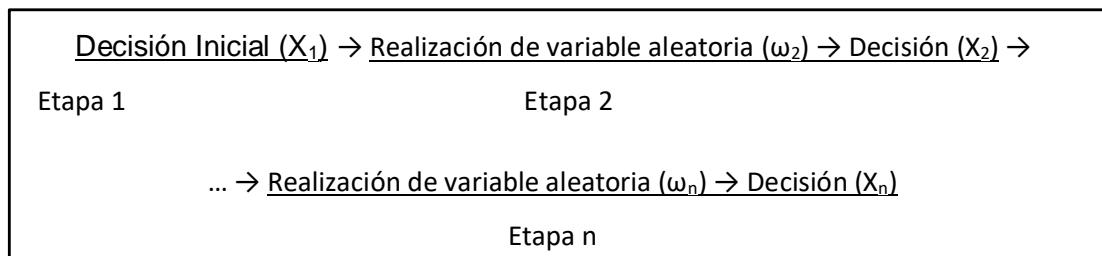
Dentro del problema planteado se verifica la existencia de parámetros estocásticos, los cuales son: cantidad obtenida de subproductos por el procesamiento de cada RAEE, tiempo de desensamblaje de cada pieza y la llegada de nuevos RAEE en el siguiente período. Debido a estas características y siguiendo las directrices de Dantzig (1955) , se ha optado por un modelo de programación lineal estocástico, el mismo que permite la optimización en ambientes de alta variabilidad.

En el procesamiento de RAEE existe un constante flujo de materiales en el tiempo, esta característica según Dantzig, (1955), Ruszczyński & Shapiro (2003) y Shapiro et al. (2009) puede ser modelada como programación lineal multietapa, donde los distintos períodos temporales son etapas del modelo. En consecuencia, este tipo de modelado será el escogido para la resolución del problema de planeación.

El trabajo de Dantzig (1955) explica que los modelos estocásticos requieren dos tipos de decisiones, iniciales y de recurso. Las decisiones iniciales son aquellas que se realizan previo al conocimiento de las variables estocásticas, mientras que las de recurso pueden ser tomadas una vez que las variables aleatorias han sido desveladas. Así este proceso de decisiones puede representarse esquemáticamente en la Figura 2.

Figura 2.

Proceso de decisión en la programación lineal estocástica



Fuente: (Shapiro et al., 2009)

El modelo ha sido construido basado en la forma matemática básica para modelos de programación lineal multietapa presentada por Shapiro et al. (2009), la misma se observa en las ecuaciones (1-6). Esta ecuación representa en X_n , a las decisiones iniciales las cuales dependen de la esperanza del cumplimiento de una variable aleatoria ω_{n+1} . Mientras que X_{n+1} , representa el conjunto de decisiones iniciales previo a la realización de ω_{n+2} , y las decisiones de recurso cuando ω_{n+1} ya se ha realizado.

$$\text{Min } c_1^T x_1 + E_{\omega_2} \{ \varphi(x_2, \omega_2) + E \dots + E_{\omega_T} \{ \varphi(x_N, \omega_N) + \} \} \quad (1)$$

Con restricciones:

$$Ax_n = b \quad (2)$$

$$x_n \in \Re^{n_1}_+ \quad (3)$$

Donde:

$$\varphi(x_n, \omega) = \text{Min } q^T x_{n+1} \quad (4)$$

Con restricciones:

$$T(\omega)x_n + Wx_{n+1} = h(\omega) \quad (5)$$

$$x_{n+1} \in \Re^{n_2}_+ \quad (6)$$

La Ecuación (1) representa la función objetivo del modelo, mientras la Ecuación (2) representan las restricciones del problema en la primera etapa de decisión. La Ecuación (4) representa la función objetivo que depende de la realización de la variable aleatoria, mientras que la Ecuación (5) representa las restricciones del problema que deben cumplir la regla de no anticipatividad. Las Ecuaciones (3 y 6) indican que las variables de decisión tanto en la primera etapa, como en las siguientes deben pertenecer al conjunto de números aleatorios.

2.2. Suposiciones de modelado.

La optimización de resultado del modelo de programación lineal estocástica está en función de las siguientes suposiciones, las mismas que han sido planteadas siguiendo las directrices para suposiciones de modelado de Hillier (2010).

- Existen parámetros constantes y estocásticos. Todos son conocidos con exactitud o en su probabilidad.
- Se consideran tres etapas, las cuales son equivalentes a tres períodos de tiempo.
- Se establece en cada etapa 3 posibles realizaciones conjuntas de las variables aleatorias.
- Todas las variables aleatorias siguen una distribución de probabilidad uniforme.
- Se considera que las llegadas esperadas de RAEE tendrán la misma distribución de probabilidad en todas las etapas.

- Se considera que la cantidad obtenida por el procesamiento y el tiempo de procesamiento en general para todos RAEE y no individualmente.
- Se ha adicionado una variable de demanda no cumplida, la cual mantiene la linealidad del modelo y representa una penalización por no haber satisfecho la demanda mínima. Esta variable ayuda a que se procese la mayor cantidad de RAEE posible, para aumentar la gestión de residuos.
- Se venderá un producto, aunque no satisfaga la demanda mínima, pagando la penalización.
- Los valores para el desensamble de Monitores de tubos de rayos catódicos (CRT) y Televisores CRT son extremadamente altos, para cumplir la política de que estos elementos solo se procesarán para la venta directa.

2.3. Identificación de parámetros y variables de decisión.

Los parámetros y variables han sido identificados, basado en el trabajo de Polat et al. (2018), en el cual se ha planteado el problema en forma determinista. La función objetivo y las restricciones del problema han sido modificadas de acuerdo a las características propias del centro de desensamble del cantón Cuenca, además de haber sido introducidos nuevos parámetros. En el Anexo A, se han identificado los parámetros y las variables de decisión que han sido utilizados en el modelo.

En los distintos parámetros y variables identificados para el modelado se pueden apreciar una serie de subíndices, los cuales hacen referencia a los conjuntos:

- $s \in S$: Conjunto de subproductos que pueden ser obtenidos.
 - Dentro de este conjunto existen dos subconjuntos: S_1 y S_2 ; venta de equipos completos (los cuales tienen un procesamiento mínimo) y venta de tarjetas de circuito impreso, respectivamente.
- $e \in E$: Conjunto de equipos de RAEE que pueden ser procesados.
 - Dentro de este conjunto existen 5 subconjuntos C_1, C_2, C_3, C_4 y C_5 . PC's, Monitores, Aparatos Informáticos, Otros Aparatos e Impresoras, respectivamente.
- $r \in R$: Conjunto de recursos que están disponibles en el centro de procesamiento.
- $m \in M$: Conjunto de métodos de procesamiento que puede efectuarse.
- $n \in N$: Conjunto que representa las etapas del sistema.
- α : Conjunto de valores aleatorios de las Llegadas.
- β : Conjunto de valores aleatorios del Tiempo de procesamiento.

- γ : Conjunto de valores aleatorios de las Cantidades que se pueden obtener.
- Ω : Conjunto de escenarios que se forman de la combinación de las variables aleatorias.
- p : probabilidad del cumplimiento de las variables aleatorias

2.4. Construcción de árbol de escenarios.

El árbol de escenarios se ha construido siguiendo el modelo presentado por Kazemi Zanjani et al. (2010), donde cada nodo de realización de las variables aleatorias es un híbrido que combina las distintas variables en un mismo nodo. En cada etapa se presentan 3 nodos, así se han generado un total de 27 escenarios finales, los que corresponden a la realización de los nodos de la última etapa.

En el Anexo B se encuentra el árbol de escenarios construido y en el mismo se puede apreciar las tres etapas que sigue el modelo. Se identifica en el árbol que la decisión inicial corresponde a la cantidad de cada RAEE que necesita ser procesada, mientras que las decisiones de recurso hacen referencia al número de recursos necesarios, a la cantidad de Stock de Entrada una vez que se realizan los ingresos esperados, la cantidad de Stock de subproductos después del procesamiento de RAEE, la cantidad de Ventas esperadas y la cantidad de demanda que no podrá ser cumplida.

2.5. Construcción del Modelo.

La construcción del modelo matemático de programación lineal estocástica, se basa principalmente en el modelo básico presentado por Dantzig (1955) y expresado matemáticamente por Shapiro et al. (2009). La base para la construcción del modelo ha sido el modelo determinista planteado por Polat et al. (2018), y se ha seguido la notación y formulación usada por Gómez-Rocha et al. (2021).

2.6. Recopilación de datos.

Los datos para la prueba del modelo de planeación y posteriormente para la simulación han sido obtenidos a través del proyecto ResCue.

El proyecto ha realizado un estudio exhaustivo de los costos que intervienen en el proceso de desensamble de RAEE. En lo que respecta a los precios de venta y la demanda, ha sido realizado por parte del proyecto un estudio del mercado local, nacional e internacional. Los pronósticos de llegadas han sido obtenidos en base al flujo actual de residuos y a la estimación de los expertos basados en los cambios en la legislación actual de responsabilidad extendida del productor y a planes de marketing para aumentar la correcta disposición de

estos residuos. Los tiempos de procesamiento y cantidades obtenidas del procesamiento han sido estimadas gracias a la colaboración del proyecto ResCue y Ecopartner en Suiza.

2.7. Resolución del modelo propuesto.

El software utilizado para la resolución ha sido LINGO 19.0, con una licencia dirigida para estudiantes. Este software utiliza la técnica de Montecarlo para la reducción de varianza.

La aleatoriedad en las variables estocásticas depende del *set seed* (el cual genera los números aleatorios y estos pueden ser reproducibles) que ha sido plantado, por tal motivo para mantener la aleatoriedad en los resultados los 16 *set seed*'s han sido generados por medio de la función “aleatorio entre” de Excel. Se han registrado en Microsoft Excel los datos del resultado económico del primer mes, para cada una de las evaluaciones. Los datos resultantes son identificados como “Lingo Óptimo”. La resolución del modelo se la ha realizado, según el árbol de escenarios.

Los datos para las evaluaciones del modelo, son los datos iniciales ofrecidos por el proyecto ResCue, estos se encuentran disponibles en el Anexo C.

2.8. Identificación de reglas de prioridad.

Se ha optado por la programación del desensamblaje basado en la programación estática, según las directrices de programación de producción de Haupt (1989). Este tipo de programación permite que el orden de procesamiento sea establecido como una política, la misma que toma el nombre de regla de prioridad.

La programación del desensamblaje se enfoca en el cuidado ambiental por tal motivo las reglas de prioridad han sido escogidas siguiendo las directrices de Schluemp et al. (2015), las mismas que indican que el desensamblaje conlleva mayores tasas de recuperación de residuos peligrosos. Por lo tanto, la primera regla se basa en desensamblar los RAEE antes que vender los equipos completos.

Dentro de los equipos que se irán a desensamblar o vender como equipos completos existen equipos más tóxicos que otros, en la Tabla 1 se muestra el nivel de toxicidad de cada uno de los RAEE, la toxicidad ha sido evaluada por Oguchi et al. (2013) según el nivel de concentración de metales pesados entre estos se encuentran: bario, plomo, antimonio, cadmio, cromo, entre otros.

Así la segunda regla de prioridad indica que se procesarán primero los elementos que representen una mayor toxicidad.

Tabla 1.

Nivel de Toxicidad de los distintos tipos de RAEE

Tipo de RAEE	Nivel de toxicidad
<i>Televisor CRT y Monitor CRT</i>	Alto-elevado
<i>Teléfono Móvil, video juegos y teléfonos</i>	Alto-moderado
<i>Reproductor de CD portable, Reproductor de minidisco portable, cámara digital y cámara de video</i>	Alto-moderado
<i>Computadora de escritorio, computadora portátil, Televisor LCD, máquina de fax, impresora, radio casete, VCR, sistema estéreo, TV FPD, Monitor FPD, DVD Player, microondas, arrocera, dispositivos eléctricos</i>	Moderado-moderado
<i>Refrigerador, máquina de lavar, aire acondicionado</i>	Bajo-moderado

Fuente: (Oguchi et al., 2013)

En el caso de existir dos tipos de equipos con el mismo nivel de toxicidad se aplica la tercera regla de prioridad, la misma que indica que se procesarán primero los equipos de un mayor peso promedio. Así el listado final de prioridades se indica en la sección de Resultados y Discusión en la Tabla 3.

2.9. Escenarios de simulación.

La simulación validará el modelo propuesto según las reglas de prioridad que han sido escogidas. Se ha optado por la simulación de eventos discretos, la misma que se realiza en el software Flexsim.

En el software Flexsim se ha simulado 16 veces cada uno de los siguientes escenarios, con el objetivo de aplicar la prueba T de hipótesis para dos muestras, la cual exige un número mínimo de 16 observaciones:

- En el primer escenario, denominado “Óptimo Flexsim”, se han procesado los resultados obtenidos para el primer mes según los resultados del modelo de planeación.
- Tres escenarios, denominados “Escenario 1”, “Escenario 2” y “Escenario 3”, se han procesado cantidades aleatorias que satisfacen las restricciones del problema y cumplen con la política de que los monitores CRT y los televisores CRT, solo tienen procesamiento para venta.
- Los dos escenarios siguientes, denominados “Escenario 4” y “Escenario 5”, se han procesado cantidades aleatorias que cumplen la política de CRT y además se procesan todos los RAEE disponibles.

Los escenarios aleatorios fueron obtenidos por medio de la función “aleatorio entre” disponible en Excel, verificando que cumpla con las restricciones del problema. En el Anexo D, se pueden observar las cantidades a procesar para cada uno de los escenarios planteados.

2.10. Suposiciones de la simulación y parametrización.

La planta de procesamiento de RAEE aún no se encuentra en funcionamiento, razón por la cual se ha optado por la validación por medio de la simulación en Flexsim. La simulación de eventos discretos funciona bajo determinadas suposiciones, bajo las cuales ofrece resultados próximos a la realidad simulada, por lo que se han seguido las siguientes suposiciones para la validación del problema:

- Se simula un mes de desensamble de RAEE, en total 576.000 segundos.
- Las cantidades obtenidas serán contadas por medio de una *tracked variable*.
- Al final del mes se realizan las llegadas esperadas según la misma distribución uniforme, con lo que se verifica si la capacidad de stock fue suficiente para todas las llegadas esperadas.
- No se tiene en cuenta tiempos de *warm up*.
- No se tiene en cuenta los tiempos logísticos de llegadas y actividades de separación.
- No se realizan salidas del sistema.

El software Flexsim permite una visualización 3D de la simulación, razón por la cual el primer paso ha sido realizar el *layout* de la planta, según el modelo de distribución de planta que ha sido planteado por Maldonado (2022), el mismo que puede observarse en la Figura 3.

El inventario inicial de la empresa se coloca en los estantes en el tiempo 0, se empieza de inmediato con las actividades de desensamble siguiendo la lista de prioridades, el desensamble se ha programado en un separador, los tiempos de proceso se han establecido según la distribución uniforme. Las cantidades de salida son contadas en las distintas colas de cada material, las mismas se cuentan por medio de una *traked variable* según la distribución estocástica. En el último segundo de la simulación se realiza la entrada aleatoria del final del mes siguiendo la distribución uniforme esperada. Las distribuciones aleatorias se encuentran disponibles en el Anexo C.

Figura 3.

Layout de la planta de procesamiento de RAEE



Fuente: (Maldonado, 2022)

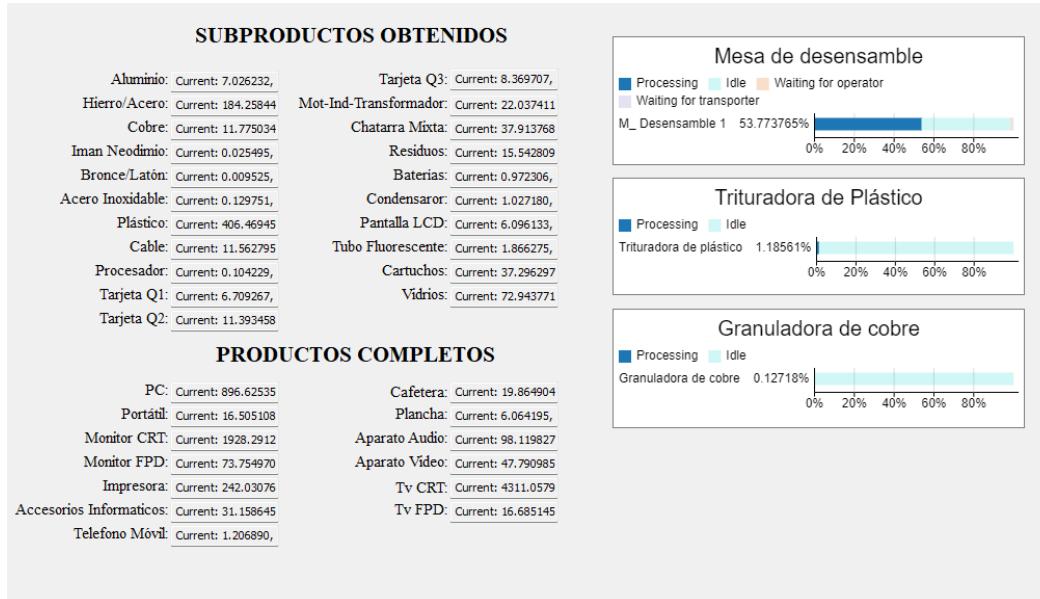
2.11. Recopilación de Resultados

Los resultados de la simulación han sido recopilados por medio de un *Dashboard* de Flexsim, según se muestra en la Figura 4. Los resultados de cada escenario han sido transferidos a Excel.

A través de Microsoft Excel se procesan los valores obtenidos en Flexsim, con estos valores se calcula las ventas, la demanda no cumplida, los niveles de stock y los tiempos de procesamiento. Así, se ha obtenido el resultado final en función de los ingresos o pérdidas generadas en el mes, según la simulación. En el Anexo E se registran los resultados obtenidos de las 16 simulaciones, de los seis escenarios.

Figura 4.

Ejemplo del Dashboard utilizado para recolectar los datos. Ejemplo del Escenario 5



Fuente: Elaboración propia.

2.12. Pruebas de hipótesis.

Para la validación del modelo se han seguido las directrices de Carson (2002), las cuales indican que un modelo puede ser validado por medio de la comparación de varios escenarios en contra posición con el modelo propuesto.

Se han recopilado un total de 16 resultados tanto para la evaluación del modelo, como para los escenarios de simulación. Con los resultados obtenidos se ha realizado la prueba estadística F de dos muestras, la cual indica si existe una diferencia significativa en la varianza de dichas muestras. Una vez verificada la diferencia de varianzas entre las muestras se ha realizado la prueba T para dos muestras, con el objetivo de comprobar si las medias entre las muestras son significativamente diferentes.

Así las hipótesis que han sido consideradas para la prueba T son:

- Para la relación Lingo Óptimo y Flexsim Óptimo.
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Flexsim Óptimo.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media de Flexsim Óptimo.
- Para la relación Lingo Óptimo y Escenario 1.
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Escenario 1.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media Escenario 1.
- Para la relación Lingo Óptimo y Escenario 2.
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Escenario 2.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media de Escenario 2.
- Para la relación Lingo Óptimo y Escenario 3
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Escenario 3.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media de Escenario 3.
- Para la relación Lingo Óptimo y Escenario 4.
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Escenario 4.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media de Escenario 4.
- Para la relación Lingo Óptimo y Escenario 5.
 - H_0 : La media de Lingo Óptimo es igual a la media de Escenario 5.
 - H_1 : La media de Lingo Óptimo es diferente a la media de Escenario 5.

Una vez validado el modelo se ha calculado el porcentaje de mejora del modelo propuesto con los distintos escenarios generados.

2.13. Generación de escenarios y presentación de Resultados

Se ha propuesto un Plan Maestro de producción (PMP) que recolecta la información de 6 meses de desensamble, donde cada mes representa un escenario inicial distinto.

Se han realizado dos PMP, según el tipo de venta posible, ventas en conjunto o individual. El primer PMP ha sido realizado en función de los RAEE que se venden en conjunto (Equipos Completos y Tarjetas de Circuito Impreso). El segundo PMP ha sido realizado en función de los subproductos que se venden individualmente. Las cantidades de subproducto obtenidas del procesamiento se basan en el primer escenario de la resolución del modelo de programación lineal estocástica.

La información de Stock Inicial a partir del segundo mes corresponde al Stock de RAEE del primer escenario realizado en el periodo anterior. El Stock Inicial de subproductos corresponde a las ventas que en la realidad no pudieron realizarse por no cumplir la demanda. En los casos en los que se vende menos que la disponibilidad total se debe a la ventaja que corresponde guardar stock para realizar más ventas en el futuro. En el Anexo F, se han detallado los valores iniciales del stock de RAEE y de subproductos de cada mes, con los cuales se ejecuta el modelo, teniendo en cuenta que no se espera que los precios y la demanda de subproductos no cambie en el transcurso de estos 6 meses.

3. Resultados y Discusión

3.1. Modelo de programación lineal estocástica

El modelo propuesto se presenta en las ecuaciones (8-28). Este modelo se basa en programación lineal estocástica multietapa, determina la cantidad de RAEE que debe ser procesada cada mes, el número de recursos necesarios para cumplir con el desensamble, las posibles ventas y la demanda no cumplida al final del mes, además de la cantidad de stock de RAEE y de subproductos que son almacenados al finalizar el período.

$$\text{MAX} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{s \in S} VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * PVS_s \\
& - \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{s \in S} DEMI_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CINC_s \\
& - \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CPT_r * TPR_{mren}^{\beta} \\
& - \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{r \in R} NR_{rn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CAR_r \\
& - \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N \sum_{e \in E} \left(2 * IE_e - \sum_{m \in M} XE_{men}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \right) * CIE_e \right. \\
& \quad \left. + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{e \in E} \left(2 * SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) - \sum_{m \in M} XE_{men}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \right) * CIE_e \right) \\
& - \sum_{\alpha=1}^A \sum_{\beta=1}^B \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} p^{\alpha\beta\gamma} \frac{1}{2} \left(\sum_{n=2}^N \sum_{e \in E} \left(2 * IS_s - SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \right) * CIS_s \right. \\
& \quad \left. + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{e \in E} \left(SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + SIS_{sn+1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) - VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \right) * CIS_s \right)
\end{aligned}$$

Sujeto a las siguientes restricciones

$$VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + DEMI_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \geq DEM_s \quad (9)$$

$$n = 1 \dots N, \forall s \in S$$

$$VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \leq SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \quad (10)$$

$$n = 1 \dots N, \forall s \in S$$

$$\sum_{s1 \in S} VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + DEMI_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \geq DEM_{s1} \quad (11)$$

$n = 1 \dots N$

$$\sum_{s2 \in S} VE_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + DEMI_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \geq DEM_{s2} \quad (12)$$

$n = 1 \dots N$

$$SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) = IE_e + LLE_{en}^{\alpha} - \sum_{m \in M} XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \quad (13)$$

$n=1, \forall e \in E$

$$SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) = SIE_{en-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + LLE_{en}^{\alpha} - \sum_{m \in M} XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \quad (14)$$

$n=2 \dots N, \forall e \in E$

$$\sum_{e \in C1} SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * VOL_e \leq CSC_1 \quad (15)$$

$n=1 \dots N$

$$\sum_{e \in C2} SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * VOL_e \leq CSC_2 \quad (16)$$

$n=1 \dots N$

$$\sum_{e \in C3} SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * VOL_e \leq CSC_3 \quad (17)$$

$n=1 \dots N$

$$\sum_{e \in C4} SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * VOL_e \leq CSC_4 \quad (18)$$

$n=1 \dots N$

$$\sum_{e \in C5} SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * VOL_e \leq CSC_5 \quad (19)$$

$n=1 \dots N$

$$\sum_{m \in M} XE_{men} \leq IE_{en}(\Omega) \quad (20)$$

$n=0, \forall e \in E$

$$\sum_{m \in M} XE_{men} \leq SIE_{en}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \quad (21)$$

n=1... N, $\forall e \in E$

$$SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) = IS_s + \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CTD_{mesn}^{\gamma} \quad (22)$$

n=1, $\forall s \in S$

$$SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) = SIS_{sn-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) - VE_{sn-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) + \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CTD_{mesn}^{\gamma} \quad (23)$$

n=2... N, $\forall s \in S$

$$SIS_{sn}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \leq CSS_s \quad (24)$$

n=1... N, $\forall s \in S$

$$\sum_{m \in M} \sum_{e \in E} TPR_{mren}^{\beta} * XE_{men-1}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \leq NR_{rt}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) * CAD_r * DIA_n \quad (25)$$

n=1... N, $\forall r \in R$

$$NR_{rt}^{\alpha\beta\gamma}(\Omega) \leq CMR_r \quad (26)$$

n=1... N, $\forall r \in R$

$$NR \in Z^+ \quad (27)$$

n = 1... N, $\forall r \in R$

$$VE, DEMI, SIS, SIE \in R^+ \quad (28)$$

n = 1... N, $\forall e \in E, \forall s \in S$

Donde la ecuación (8) representa la función objetivo la cual máxima los ingresos por medio de las posibles ventas, al mismo tiempo que se cuentan los costos de no cumplir la demanda, los costos de procesamiento, los costos de abrir cada recurso y los costos de stocks tanto para entradas de RAEE, como para los subproductos. Las ecuaciones (9-28) representan las restricciones del modelo.

Las ecuaciones (9-12) representan las restricciones de venta: cumplimiento de la demanda (9), límite para las ventas (10), cumplimiento de la demanda para productos completos (11), cumplimiento de la demanda para las tarjetas de circuito impreso (12).

Las ecuaciones (13-19) representan las restricciones del inventario de entrada: stock de entrada al finalizar el primer mes (13), stock de entrada al finalizar los meses subsiguientes (14), capacidad máxima de stock de RAEE según la categoría de almacenamiento (15-19). Las ecuaciones (20-21) representan la capacidad productiva máxima de cada mes.

Las ecuaciones (22-24) representan las restricciones del inventario de subproductos: stock de subproductos al finalizar el primer mes (22), stock de subproductos al finalizar los meses siguientes (23), capacidad máxima de stock para subproductos (24).

Las ecuaciones (25-27) representan las restricciones de los recursos: restricción del tiempo (25), restricción de recursos disponibles (26) y el número de recursos debe ser un número naturales (27). La ecuación (28) indica el dominio de las variables de decisión.

El modelo ha sido evaluado con los datos del Anexo C, según los cuales el stock inicial de RAEE, corresponde a la cantidad de RAEE que actualmente se encuentra en el centro de tratamiento y considerando que el stock inicial de subproductos es 0 debido a que aún no se ha dado inicio a procesos de desensamblaje.

Se han realizado un total de 16 evaluaciones cada una de ellas con 27 escenarios distintos. Las distintas evaluaciones realizadas han brindado los mismos resultados para las unidades de RAEE que deben ser procesados por medio de desensamblaje o para la venta de equipos completos, los resultados del mix de procesamiento se pueden observar en la Tabla 2. En todas las evaluaciones el resultado para los recursos necesarios ha indicado que se necesita la misma cantidad de recursos, los cuales se observan en la Tabla 3. Los niveles de Stock final de RAEE, depende de la realización del escenario, al igual que el nivel de stock final de subproductos

Tabla 2.

Unidades de RAEE que deben ser procesados en el primer mes según los datos del Anexo C.

PC/Servidor	Portátil	Monitor de PC CRT	Monitor de PC FPD	Impresora	Accesorios informáticos	Teléfono móvil	Cocina SHA	Ropa SHA	Aparatos de audio	Aparatos de video	TV CRT	TV FPD
<i>DESENSAMBLE [und]</i>												
98	7	0	20	0	62	0	0	15	36	19	0	4

<i>EQUIPOS COMPLETOS [und]</i>												
0	0	114	0	204	0	7	10	0	0	0	110	0

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de LINGO.

En las tablas 2 y 4, así como en los Anexos se encuentran los RAEE: Cocina SHA y Ropa SHA. Los mismos que pertenecen a la notación propia del proyecto y sirven para referirse a los equipos de Cocina como cafeteras, teteras, calentadores de agua, etc, mientras que Ropa SHA hace referencia a equipos para la ropa como planchas, humidificadores, planchas de vapor, etc.

Tabla 3.

Recursos Necesarios para el primer mes de producción según los datos del Anexo C.

<i>RECURSOS NECESARIOS [rec]</i>	
<i>Mesa de desensamble</i>	1
<i>Trituradora de plástico</i>	1
<i>Granuladora de cable de cobre</i>	1

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de LINGO.

Los resultados económicos debido al procesamiento de estas cantidades de RAEE, para el primer mes de producción, se han recolectado a partir del primer escenario de cada evaluación. Estos resultados se han recopilado en la segunda columna de la Tabla 5.

El modelo planteado posee las características propias del centro de desensamble del cantón Cuenca por lo que difiere en sus restricciones y función objetivo. Así se presentan diferencias y ventajas frente a otros métodos planteados anteriormente.

El modelo permite seleccionar el método de procesamiento de RAEE sea este un pequeño procesamiento para la venta como Equipos Completos o el desensamble total o parcial, presentándose así una ventaja frente al modelo de Xia et al. (2014) que cambia el desensamble completo por el selectivo. El modelo actual además al ser estocástico tiene en cuenta la variabilidad, lo cual estudios como Bo et al. (2019) y Capraz et al. (2015) no habían tenido en cuenta. Con respecto al estudio de Kapukaya et al. (2019) el cual se basa en la minimización de costos, no tiene en cuenta los precios de venta de los subproductos a diferencia del modelo planteado. El modelo de Polat et al. (2018), que sirvió como base del presente modelo, no tiene en cuenta características propias de los inventarios de RAEE del cantón Cuenca que han sido plasmadas en el modelo propuesto.

3.2. Listado de prioridad de procesamiento para cada RAEE

El listado de prioridad ha sido realizado siguiendo las reglas de prioridad establecidas. Las mismas indican que primero se procesan aquellos elementos que van a ser desensamblados, entre estos se han seleccionado primero los que poseen un mayor nivel contaminante y luego entre estos se escogen los más pesados.

Tabla 4.

Lista de prioridad de procesamiento según las reglas de prioridad establecidas

Prioridad de procesamiento	
<i>Desensamble</i>	
<i>Primero</i>	Televisión CRT
<i>Segundo</i>	Monitor CRT
<i>Tercero</i>	Teléfono Móvil
<i>Cuarto</i>	Aparato de Audio
<i>Quinto</i>	Televisión FPD
<i>Sexto</i>	PC/Servidor
<i>Séptimo</i>	Monitor FPD
<i>Octavo</i>	Impresora
<i>Noveno</i>	Portátil
<i>Décimo</i>	Aparato de Video
<i>Décimo primero</i>	Accesorios Informáticos
<i>Décimo segundo</i>	Cocina SHA
<i>Décimo tercero</i>	Ropa SHA
<i>Equipos Completos</i>	
<i>Décimo cuarto</i>	Televisión CRT
<i>Décimo quinto</i>	Monitor CRT
<i>Décimo sexto</i>	Teléfono Móvil
<i>Décimo séptimo</i>	Aparato de Audio
<i>Décimo octavo</i>	Televisión FPD
<i>Décimo noveno</i>	PC/Servidor
<i>Vigésimo</i>	Monitor FPD
<i>Vigésimo primero</i>	Impresora
<i>Vigésimo segundo</i>	Portátil
<i>Vigésimo tercero</i>	Aparato de Video
<i>Vigésimo cuarto</i>	Accesorios Informáticos

Vigésimo quinto	Cocina SHA
Vigésimo sexto	Ropa SHA

Fuente: Elaboración propia a partir de las reglas de prioridad establecidas.

La programación del desensamble según los niveles de toxicidad ayuda al cumplimiento del objetivo ambiental del proyecto. Otros modelos presentados anteriormente también han presentado en su elaboración un objetivo de protección ambiental: Yeh & Xu (2013) en el cual uno de los factores de decisión es el posible impacto ambiental y la posibilidad de la reducción de RAEE en botadores; Kapukaya et al. (2019) han propuesto en su modelo la maximización de recolección de sustancias peligrosas; Khakbaz (2022) propone, para satisfacer el objetivo ambiental, la sustitución bidireccional de productos.

La novedad del modelo propuesto se basa en introducir el factor ambiental dentro del proceso de programación del desensamble, con este nuevo enfoque se consigue mantener independiente el objetivo económico y el ambiental del proyecto y a su vez dar cumplimiento a los mismos.

3.3. Simulaciones en Flexsim de distintos escenarios

Los distintos escenarios simulados se han realizado siguiendo las reglas de prioridad establecidas en base a los niveles de toxicidad. En la Tabla 5, se han presentado los resultados económicos obtenidos por el procesamiento de las cantidades que corresponden a cada escenario, las mismas pueden ser observadas en el Anexo D.

Tabla 5.

Resultados económicos del primer escenario de las evaluaciones del modelo y de las simulaciones en Flexsim.

Obs.	LINGO	FLEXSIM	ESCENARIO	ESCENARIO	ESCENARIO	ESCENARIO	ESCENARIO
	OPTIMO	OPT	1	2	3	4	5
1	-\$1,373.28	-\$1,341.32	-\$2,995.47	-\$1,969.03	-\$2,816.00	-\$1,977.30	-\$3,042.74
2	-\$1,350.76	-\$1,337.57	-\$2,990.60	-\$1,972.72	-\$2,818.43	-\$1,987.86	-\$3,042.04
3	-\$1,340.30	-\$1,330.88	-\$2,984.61	-\$1,970.45	-\$2,810.80	-\$1,992.07	-\$3,049.53
4	-\$1,385.64	-\$1,333.60	-\$2,978.56	-\$1,976.42	-\$2,807.64	-\$1,989.47	-\$3,049.84
5	-\$1,372.47	-\$1,342.88	-\$2,996.27	-\$1,964.39	-\$2,817.06	-\$1,987.97	-\$3,049.21
6	-\$1,315.25	-\$1,328.81	-\$2,984.59	-\$1,983.09	-\$2,813.52	-\$1,986.97	-\$3,053.72
7	-\$1,252.42	-\$1,330.55	-\$2,994.67	-\$1,962.40	-\$2,813.50	-\$1,997.06	-\$3,054.18
8	-\$1,364.95	-\$1,345.58	-\$2,986.93	-\$1,980.15	-\$2,808.16	-\$1,997.86	-\$3,048.53

9	-\$1,358.67	-\$1,355.18	-\$2,994.64	-\$1,972.75	-\$2,816.24	-\$1,992.11	-\$3,052.65
10	-\$1,347.24	-\$1,333.89	-\$2,978.69	-\$1,977.56	-\$2,807.14	-\$1,988.39	-\$3,049.40
11	-\$1,232.44	-\$1,342.87	-\$3,002.56	-\$1,979.88	-\$2,809.33	-\$1,992.35	-\$3,044.86
12	-\$1,310.70	-\$1,344.39	-\$2,991.81	-\$1,980.76	-\$2,806.74	-\$1,986.52	-\$3,060.07
13	-\$1,486.99	-\$1,349.58	-\$2,995.12	-\$1,970.88	-\$2,814.88	-\$1,981.47	-\$3,043.12
14	-\$1,374.37	-\$1,353.16	-\$2,981.18	-\$1,970.06	-\$2,810.74	-\$1,992.21	-\$3,050.15
15	-\$1,336.24	-\$1,346.06	-\$2,985.44	-\$1,977.61	-\$2,816.31	-\$1,986.39	-\$3,054.84
16	-\$1,473.17	-\$1,348.46	-\$2,993.08	-\$1,979.17	-\$2,812.40	-\$1,990.29	-\$3,050.69

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos por LINGO y por Flexsim.

Al observar los resultados se puede ha sido posible apreciar que durante el primer mes de procesamiento tanto en la evaluación del modelo en LINGO, como en las simulaciones de Flexsim, los resultados son negativos, lo que significa que habrá pérdidas durante este mes. Por lo tanto, el factor que nos indica cual es el mejor escenario es aquel que produce menores perdidas.

3.4. Validación del modelo

Los resultados de la prueba F para cada una de las muestras de los distintos escenarios en comparación con los resultados de LINGO Óptimo se muestran en la Tabla 6. Al realizar la prueba F podemos verificar que se rechaza la hipótesis de varianzas iguales en todos los casos, razón por la cual se ha utilizado la prueba T para varianzas distintas.

Tabla 6.

Resultados de la prueba F de la comparación de las muestras de Lingo Óptimo, con cada uno de los escenarios simulados.

Prueba F de

LINGO Óptimo	p value	F Crítico	Valor f	Valor P	Decisión
--------------	---------	-----------	---------	---------	----------

con:

Flexsim Óptimo	0.05	2.403447	62.19672	9.4668E-11	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 1	0.05	2.403447	86.25625	8.63829E-12	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 2	0.05	2.403447	114.6407	1.06203E-12	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 3	0.05	2.403447	281.0938	1.36235E-15	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 4	0.05	2.403447	158.3959	9.70144E-14	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 5	0.05	2.403447	177.6384	4.14281E-14	Se rechaza la hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la prueba F realizada en Microsoft Excel.

Los resultados de la prueba T de dos muestras con varianzas distintas se puede observar en la Tabla 7. En los mismos se observa que no existe una diferencia significativa para considerar los valores de Lingo Óptimo distintos con los de Flexsim Óptimo, por lo que podemos decir que la simulación en Flexsim corrobora los resultados obtenidos por medio del modelo de evaluado en LINGO. Con respecto a los distintos escenarios se puede observar que la hipótesis nula es rechazada, lo que indica que las observaciones de las muestras son significativamente diferentes con el 95% de certeza.

Tabla 7.

Resultados de la prueba T de la comparación de las muestras de Lingo Óptimo, con cada uno de los escenarios simulados.

Prueba T de

LINGO Óptimo	p value	T Crítico	Valor T	Valor P	Decisión
<i>con:</i>					
Flexsim Óptimo	0.05	2.144787	-0.68109	0.506926717	No se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 1	0.05	2.144787	94.129	5.09795E-21	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 2	0.05	2.144787	35.75689	3.68085E-15	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 3	0.05	2.144787	84.22971	2.4093E-20	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 4	0.05	2.144787	36.65584	2.60902E-15	Se rechaza la hipótesis nula
ESCENARIO 5	0.05	2.144787	97.84014	2.96906E-21	Se rechaza la hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la prueba F realizada en Microsoft Excel.

Debido a que las muestras son significativamente diferentes en la Tabla 8, se han recopilado la media muestral para Lingo Óptimo y para cada uno de los escenarios. En estos resultados se ha observado que el valor de Lingo Óptimo es el que menos perdidas genera durante el primer mes de procesamiento.

Tabla 8.

Media muestral de los resultados económicos para el primer mes de procesamiento, en los distintos escenarios.

Resultados Económicos

LINGO OPT	FLEXSIM OPT	FLEXSIM 1	FLEXSIM 2	FLEXSIM 3	FLEXSIM 4	FLEXSIM 5
-\$1,354.68	-\$1,341.55	-\$2,989.64	-\$1,974.21	-\$2,812.43	-\$1,989.14	-\$3,049.72

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9, se ha calculado la mejora porcentual que representa el modelo Lingo Óptimo con respecto a los escenarios generados aleatoriamente. En los mismos se aprecia que el modelo Lingo Óptimo ha generado mejoras de entre el 30 al 55% aproximadamente. Dicho esto, se afirma que el modelo de programación lineal estocástico presenta mejores resultados que los diferentes escenarios aleatorios.

Tabla 9.

Mejora porcentual que representa procesar las cantidades de LINGO, frente a cada escenario aleatorio.

PORCENTAJE DE MEJORA DE LINGO OPTIMO CON RESPECTO A:

ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 5
54.688 %	31.381%	51.832 %	31.896 %	55.580 %

Fuente: Elaboración propia.

En las mejoras porcentuales no se aprecia una diferencia de mejora cuando se trata de los Escenarios 1, 2 y 3, o de los Escenarios 4 y 5; esto nos indica que las mejoras no dependen de que se ha procesado todos los elementos disponibles, sino antes de la correcta selección del método de procesamiento.

3.5. Plan Maestro de Producción

El modelo ha sido utilizado para la creación de distintos programas maestro de producción (PMP). Debido a la gran cantidad de subproductos que pueden existir se han tomado en cuenta dos subproductos, el primero son las Tarjetas de Circuito Impreso, el segundo es el Acero Inoxidable.

El PMP para las Tarjetas de circuito impreso ha sido seleccionado debido a que son productos que se venden en conjunto es decir deben cumplir el requerimiento mínimo individual y entre todos deben cumplir una demanda conjunta. En el caso de las Tarjetas cada tipo debe ser de por lo menos 20 kilogramos y en conjunto debe haber 500 kilogramos para que una venta pueda ser posible. En la Tabla 10, se ha realizado el PMP para estas Tarjetas de Circuito Impreso.

Tabla 10.

Programa Maestro de Producción para obtener tarjetas de Circuito Impreso.

Tarjetas de Circuito Impreso						
<i>Periodo</i>	1	2	3	4	5	6
<i>Dem. Mínima Tajetas [kg]</i>	500	500	500	500	500	500
<i>Dem. Mínima Tar. Q1 [kg]</i>	20	20	20	20	20	20
<i>Dem. Mínima Tar. Q2 [kg]</i>	20	20	20	20	20	20
<i>Dem. Mínima Tar. Q3 [kg]</i>	20	20	20	20	20	20
<i>Stock Inicial Tar. Q1 [kg]</i>	0.000	112.873	9.686	318.143	226.539	75.254
<i>Stock Inicial Tar. Q2 [kg]</i>	0.000	8.390	4.972	23.602	4.219	2.840
<i>Stock Inicial Tar. Q3 [kg]</i>	0.000	30.824	0.000	61.358	0.000	0.000
<i>Producción Tar. Q1 [kg]</i>	112.873	278.453	308.457	256.372	267.405	294.266
<i>Producción Tar. Q2 [kg]</i>	8.390	21.529	18.630	17.028	18.621	16.315
<i>Producción Tar. Q3 [kg]</i>	30.824	62.589	61.358	54.254	61.309	54.959
Possible Venta Tarjetas [kg]	0.000	500.000	0.000	500.000	500.000	0.000
<i>Possible Venta Tar. Q1 [kg]</i>	0.000	381.639	0.000	347.975	418.691	0.000
<i>Possible Venta Tar. Q2 [kg]</i>	0.000	24.947	0.000	36.412	20.000	0.000
<i>Possible Venta Tar. Q3 [kg]</i>	0.000	93.413	0.000	115.612	61.309	0.000
<i>Stock Final Tar. Q1 [kg]</i>	112.873	9.686	318.143	226.539	75.254	369.519
<i>Stock Final Tar. Q2 [kg]</i>	8.390	4.972	23.602	4.219	2.840	19.155
<i>Stock Final Tar. Q3 [kg]</i>	30.824	0.000	61.358	0.000	0.000	54.959
<i>PC/Servidor [und]</i>	98	203	227	170	218	205
<i>Portátil [und]</i>	7	91	85	132	99	99
<i>Monitor de PC FPD [und]</i>	20	170	166	136	140	159
<i>Impresora [und]</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Accesorios informáticos [und]</i>	62	820	661	827	647	651
<i>Teléfono móvil [und]</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Aparatos de audio [und]</i>	36	1	1	2	2	2
<i>Aparatos de video [und]</i>	19	8	8	9	9	9
<i>TV FPD [und]</i>	4	1	1	2	1	1

Fuente: Elaboración propia a partir de 6 escenarios iniciales mensuales.

Por medio del PMP que se ha realizado para las Tarjetas de circuito impreso se puede observar que no es posible satisfacer la demanda mínima de estos productos en todos los períodos. Los stocks iniciales se suman con la producción obtenida, la cual se basa a su vez en las cantidades procesadas de RAEE por desensamble que se ubican en la sección 4 del PMP, si estos valores individualmente para cada Tarjeta de circuito impreso son superiores a 20 kg y entre los 3 son superiores a 500kg se puede realizar la venta caso contrario esta cantidad se almacena como stock final, la misma que corresponde al stock inicial del siguiente periodo. Como se aprecia en el PMP solamente se producirán ventas en los períodos 2, 4 y 5.

El PMP para el Acero Inoxidable ha sido seleccionado debido a que es un subproducto representativo de todos aquellos que se venden individualmente. Además, el Acero Inoxidable es un subproducto que, debido al flujo actual de RAEE de la planta, no puede satisfacerse la demanda en todos los períodos. En la Tabla 11, se ha realizado el PMP para el Acero Inoxidable.

Tabla 11.

Programa Maestro de Producción para obtener Acero inoxidable.

Acero Inoxidable						
Periodo	1	2	3	4	5	6
Demanda Mínima	20	20	20	20	20	20
Stock Inicial	0	4.972	17.735	10.530	2.843	16.197
Producción	4.972	12.763	12.795	12.313	13.35473	11.873
Possible Venta	0	0	20	20	0	20
Stock Final	4.972	17.735	10.530	2.843	16.197	8.070
MPS PC/Servidor	98	203	227	170	218	205
MPS Portátil	7	91	85	132	99	99
MPS Teléfono Móvil	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de 6 escenarios iniciales mensuales.

Al observar los distintos PMP puede verificarse que existen casos en los que se vende menos que la disponibilidad total se debe a la ventaja que corresponde guardar stock para realizar más ventas en el futuro más próximo. Esta característica se verifica en los subproductos que el flujo actual de la planta no consigue satisfacer toda la demanda en un solo periodo. Así por medio del PMP se puede verificar que la lógica del modelo de planeación ayuda a mejorar las ventas de subproductos.

4. Conclusiones

La metodología propuesta, para la elaboración de un modelo de programación y planeación del desensamblaje de RAEE en el cantón Cuenca, indica que el enfoque basado en programación lineal estocástica se adecua al problema propuesto y genera mayores beneficios que otros escenarios de producción. La programación de la producción en base a los niveles de toxicidad ayuda al cumplimiento del objetivo ambiental y social del Proyecto ResCue, sin generar costos, ni tiempos adicionales.

Los resultados obtenidos nos indican que las variables estocásticas: llegadas esperadas de RAEE, cantidades obtenidas de subproductos y tiempos de desensamblaje, influyen en los beneficios obtenidos. Por tal razón no tener en cuenta estos factores disminuye la eficiencia en una planta de procesamiento de RAEE.

En base a los distintos escenarios planteados, se puede determinar que la forma menos eficiente de programar la producción sería únicamente verificar que se satisfagan las restricciones, por lo que el uso de un modelo de optimización se vuelve inevitable para generar beneficios. En la planta del Cantón Cuenca debería ser usado el modelo propuesto puesto que responde a las necesidades específicas de la gestión, generando los más altos beneficios.

El plan maestro de la producción generado a partir de la programación estocástica, muestra ventajas, en cuanto a la decisión de ventas puesto que permite maximizar las posibles ventas de la planta. Al mismo tiempo los distintos escenarios sucesivos permiten ver una mejora en la secuencia en la toma de decisiones para la venta de subproductos.

La simulación de eventos discretos en Flexsim nos indica que el modelo propuesto soluciona el problema en la realidad, en lo que se refiere a los tiempos de procesamiento y cantidades obtenidas al procesar y por lo mismo en los beneficios económicos del sistema.

El enfoque de la investigación va más allá del ámbito económico, pues tiene en cuenta las prioridades de desensamblaje basadas en los niveles de toxicidad. Sin embargo, si el proyecto no consigue ser eficiente económicamente, no podrá subsistir, razón por la cual en pro del beneficio ambiental y social es necesario el beneficio económico.

Dicho esto, se concluye que el uso del modelo de planeación y programación del desensamblaje de RAEE propuesto debe ser usado, en cada período de tiempo, para que la planta de procesamiento pueda ser eficiente. La presente investigación puede servir de base para nuevos modelos que satisfagan las necesidades en distintas plantas de procesamiento de RAEE, teniendo en cuenta las características propias de cada planta y del mercado.

Referencias

- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association.
- Bo, Y., Wang, Y., & Wan, Z. (2019). Optimizing the WEEE Recovery Network Associated with Environmental Protection Awareness and Government Subsidy by Nonlinear Mixed Integer Programming. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, e9858670. <https://doi.org/10.1155/2019/9858670>
- Brander *, P., & Forsberg, R. (2005). Cyclic lot scheduling with sequence-dependent set-ups: A heuristic for disassembly processes. *International Journal of Production Research*, 43(2), 295-310. <https://doi.org/10.1080/0020754042000270403>
- Budak, A. (2020). Sustainable reverse logistics optimization with triple bottom line approach: An integration of disassembly line balancing. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122475>
- Capraz, O., Polat, O., & Gungor, A. (2015). Planning of waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling facilities: MILP modelling and case study investigation. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(4), 479-508. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9217-3>
- Carson, J. S. (2002). Model verification and validation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 1, 52-58 vol.1. <https://doi.org/10.1109/WSC.2002.1172868>
- Dantzig, G. B. (1955). Linear Programming under Uncertainty. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.3-4.197>
- EMAC. (2021). *Rendición de Cuentas de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca* (Rendición de Cuentas 2021 N.º 2021; p. 49). EMAC. https://emac.gob.ec/wp-content/uploads/2022/04/rendicion-de-cuentas_Final-3.pdf
- Gómez-Rocha, J. E., Hernández-Gress, E. S., & Rivera-Gómez, H. (2021). Production planning of a furniture manufacturing company with random demand and production capacity using stochastic programming. *PLOS ONE*, 16(6), e0252801. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252801>
- Haupt, R. (1989). A survey of priority rule-based scheduling. *OR Spektrum*, 11(1), 3-16. <https://doi.org/10.1007/BF01721162>
- Hillier, F. S. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. 1010.
- Ilankoon, I. M. S. K., Ghorbani, Y., Chong, M. N., Herath, G., Moyo, T., & Petersen, J. (2018). E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Management*, 82, 258-275. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.018>

- INEC. (2019). *Información Ambiental en Hogares ESPND 2018*. INEC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Hogares/Hogares_2018/Presentacion_Ambiental_hogares_2018_24_12.pdf
- Jin, G. Q., Li, W. D., Wang, S., & Gao, S. M. (2019). A Systematic Selective Disassembly Approach for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). En W. Li & S. Wang (Eds.), *Sustainable Manufacturing and Remanufacturing Management: Process Planning, Optimization and Applications* (pp. 285-318). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73488-0_12
- Kapukaya, E. N., Bal, A., & Satoglu, S. I. (2019). A bi-objective model for sustainable logistics and operations planning of WEEE recovery. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 9(2), Art. 2. <https://doi.org/10.111121/ijocata.01.2019.00718>
- Kazemi Zanjani, M., Noureldath, M., & Ait-Kadi, D. (2010). A multi-stage stochastic programming approach for production planning with uncertainty in the quality of raw materials and demand. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4701-4723. <https://doi.org/10.1080/00207540903055727>
- Khakbaz, A. (2022). Production planning of a closed-loop hybrid system on primary/secondary market under WEEE Directive and 2-way substitution. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 9(2), 263-279. <https://doi.org/10.1080/23302674.2021.1881652>
- LEY ORGÁNICA DE ECONOMÍA CIRCULAR INCLUSIVA, Pub. L. No. 488, 43 (2021).
- Liu, K., & Zhang, Z.-H. (2018). Capacitated disassembly scheduling under stochastic yield and demand. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 244-257. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.032>
- Maldonado, A. del C. (2022). *Diseño de un Modelo de Distribución de Planta para un Centro de Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Caso de Estudio Cantón Cuenca-Ecuador*. Universidad de Cuenca.
- Mercurio, R. E. (2021, junio 13). *Basura tecnológica se recicla poco en Cuenca—Diario El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2021/06/13/basura-tecnologica-se-recicla-poco-en-cuenca/>
- Murthy, V., & Ramakrishna, S. (2022). A Review on Global E-Waste Management: Urban Mining towards a Sustainable Future and Circular Economy. *Sustainability*, 14(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/su14020647>
- Oguchi, M., Sakanakura, H., & Terazono, A. (2013). Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Science of The Total Environment*, 463-464, 1124-1132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.078>

- Polat, O., Capraz, O., & Gungor, A. (2018). Modelling of WEEE recycling operation planning under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 180, 769-779.
- Ramón, J. (1992). *La planeación y el control de la producción*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Schluep, M., Spitzbart, M., & Blaser, F. (s. f.). Guia de Desmontagem para Equipamentos de TI. *Sustainable Recycling Industries*. Recuperado 9 de enero de 2023, de <https://www.sustainable-recycling.org/reports/guia-de-desmontagem-para-equipamentos-de-ti/>
- Shapiro, A., Dentcheva, D., & Ruszczynski, A. (2009). *Lectures on Stochastic Programming. Modeling and Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Programming Society.
- Souza, G. C. (2013). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research*: Closed-Loop Supply Chains. *Decision Sciences*, 44(1), 7-38. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2012.00394.x>
- Tanimizu, Y., Sakamoto, M., & Nonomiya, H. (2017). A Co-evolutionary Algorithm for Open-shop Scheduling with Disassembly Operations. *Procedia CIRP*, 63, 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.138>
- Xia, K., Gao, L., Chao, K.-M., & Wang, L. (2015). A Cloud-Based Disassembly Planning Approach towards Sustainable Management of WEEE. *2015 IEEE 12th International Conference on e-Business Engineering*, 203-208. <https://doi.org/10.1109/ICEBE.2015.42>
- Xia, K., Gao, L., Li, W., Wang, L., & Chao, K.-M. (2014, octubre 3). A Q-Learning Based Selective Disassembly Planning Service in the Cloud Based Remanufacturing System for WEEE. ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference. <https://doi.org/10.1115/MSEC2014-4008>
- Yeh, C.-H., & Xu, Y. (2013). Sustainable planning of e-waste recycling activities using fuzzy multicriteria decision making. *Journal of Cleaner Production*, 52, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.003>

Anexos

Anexo A: Parámetros y variables del modelo

PARÁMETROS CONTANTES

Abreviación	Nombre de la Variable	Descripción	Und.
<i>PVS_s</i>	Precio de Venta	Precio al que se puede vender un subproducto s.	\$/Kg
	Penalización	Es el valor de penalización por no cumplir la demanda	\$/Kg
<i>C/NC</i>	Stock Inicial de RAEE	Stock de RAEE e disponible al inicio del periodo de análisis.	und
	Costo de Inventario de RAEE	Costo mensual de mantener una unidad de RAEE e en el inventario.	\$/und
<i>CSC_c</i>	Capacidad de Inventario de RAEE	Capacidad máxima de RAEE e que puede estar en inventario para cada categoría c	m ³
	Volumen de RAEE	Volumen promedio de cada tipo de RAEE	m ³
<i>IS_s</i>	Stock Inicial de subproductos	Stock de subproductos s disponible al inicio del periodo de análisis.	Kg
	Costo de Inventario de subproductos	Costo mensual de mantener una unidad de subproductos s en el inventario	\$/Kg
<i>CSS_s</i>	Capacidad de Inventario de subproductos	Capacidad máxima de subproductos s que puede estar en inventario	Kg
	Costo de Procesamiento	Costo de procesar en un recurso r	\$/seg
<i>CAR_r</i>	Costo de Abrir un Recurso	Costo por utilizar un recurso r en el período	\$/rec
	Capacidad Diaria	Capacidad diaria de procesamiento de cada recurso	seg
<i>CMR_r</i>	Máximo Número de Recursos	Número Máximo de recursos disponibles en la planta	rec
	Días	Número de días laborables en cada periodo	día

DEM_s	Demanda Mínima	Demanda mínima de cada subproducto	Kg
DEM_{s1}	Demanda Mínima de Aparatos Completos	Demanda mínima conjunta para los aparatos que se venden completos	Kg
DEM_{s2}	Demanda Mínima de Tarjetas de Circuito Impreso	Demanda Mínima para las tarjetas de circuito impreso que se venden en conjunto	Kg

PARÁMETROS ESTOCÁSTICOS

Abreviación	Nombre de la Variable	Descripción	Und.
CTD_{esn}	Cantidad de Subproducto	Cantidad de subproductos que se puede obtener por procesar el RAEE e	Kg
TPR_{ern}	Tiempo de procesamiento	Tiempo necesario para procesar el RAEE e en el recurso r	seg
LLE_{en}	Llegadas esperadas del RAEE e en el periodo n	Llegadas esperadas del RAEE e en el periodo n	und

VARIABLES DE DECISIÓN INICIAL

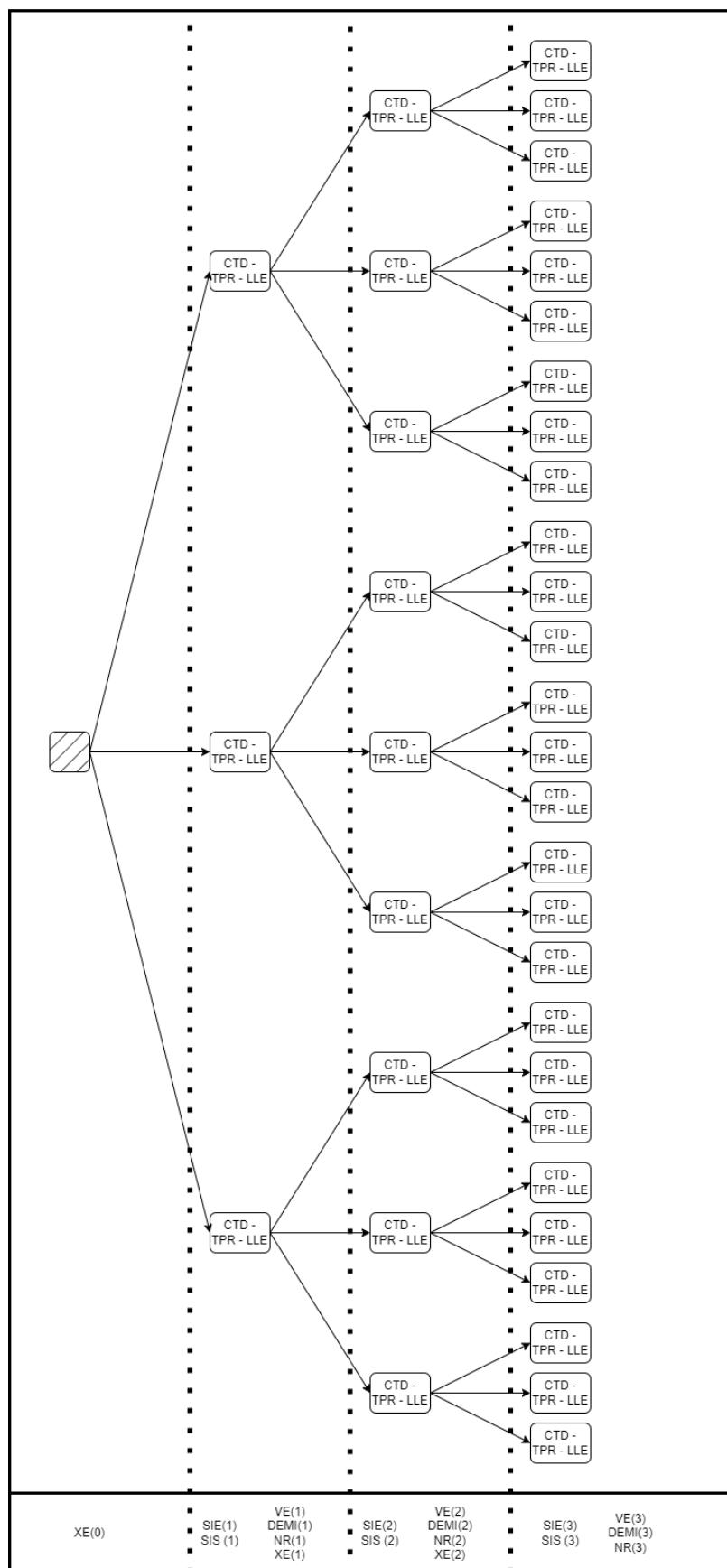
Abreviación	Nombre de la Variable	Descripción	Und.
XE_{en}	Cantidad a procesar	Cantidad de RAEE e que debe ser procesada en el período n	und

VARIABLES DE DECISIÓN DE RECURSO

Abreviación	Nombre de la Variable	Descripción	Und.
VE_s	Ventas	Ventas al final del periodo del subproducto s	Kg
NR_{rn}	Numero de Recursos	Número de recursos r necesarios en el período n	rec
$DEMI_{sn}$	Demanda Incumplida	Es una variable auxiliar que mantiene la linealidad del problema, exigiendo el máximo cumplimiento de la demanda	Kg

SIS_{sn}	Stock inicial de subproductos	Cantidad de subproductos disponibles al inicio del período n	und
SIE_{en}	Stock inicial de RAEE	Cantidad de RAEE e disponible al final del período n	und

Anexo B: Árbol de decisiones



Anexo C: Datos Actuales del centro de procesamiento de RAEE en el cantón Cuenca
Conjuntos:

E = {PC/Servidor, Portátil, Monitor de PC CRT, Monitor de PC FPD, Impresora/Escáner/Copiadora, Accesorios Informáticos, Teléfono Móvil, Cocina Cafetera, Plancha, Aparatos de Audio/Cd Grabadora, Aparatos de Video/Reproductor CD, TV CRT, TV FPD}

C1 \in E = {PC/Servidor, Portátil}

C2 \in E = {Monitor de PC CRT, Monitor de PC FPD, TV CRT, TV FPD}

C3 \in E = {Accesorios Informáticos, Teléfono Móvil}

C4 \in E = {Cocina Cafetera, Plancha, Aparatos de Audio/Cd Grabadora, Aparatos de Video/Reproductor}

C5 \in E = {Impresora/Escáner/Copiadora}

S = {*PC/Servidor, *Portátil, *Monitor de PC CRT, *Monitor de PC FPD, *Impresora/Escáner/Copiadora, *Accesorios Informáticos, *Teléfono Móvil, *Cocina *Cafetera, *Plancha, *Aparatos de Audio/Cd Grabadora, *Aparatos de Video/Reproductor CD, *TV CRT, *TV FPD, Aluminio, Hierro/Acero, Cobre, Imán de Neodimio, Bronce/Latón, Acero Inoxidable, Plástico, Cable sin Enchufe, Procesador, Tarjeta de Circuito Impreso Q1, Tarjeta de Circuito Impreso Q2, Tarjeta de Circuito Impreso Q3, Motores/Inductores/Transformadores, Chatarra Mixta, Residuos Finales, Baterías, Condensadores, Pantalla LCD, Tubos Fluorescentes/Lámparas Fluorescentes, Cartuchos de Impresora, Vidrio}

S1 \in S = {*PC/Servidor, *Portátil, *Monitor de PC CRT, *Monitor de PC FPD, *Impresora/Escáner/Copiadora, *Accesorios Informáticos, *Teléfono Móvil, *Cocina *Cafetera, *Plancha, *Aparatos de Audio/Cd Grabadora, *Aparatos de Video/Reproductor CD, *TV CRT, *TV FPD}

S2 \in S = {Tarjeta de Circuito Impreso Q1, Tarjeta de Circuito Impreso Q2, Tarjeta de Circuito Impreso Q3}

R = {Mesa de desensamble, Trituradora de Plástico, Granuladora de Cobre}

M = {Venta Directa, Desensamble}

N = {0, 1, 2, 3}

Los parámetros constantes son:

Categorías

CSC [m³]	PC	Mon	Inform	Apar	Impr
16	25	2	1	10	

Categorías

	C	T _r
DEMs1 [kg]	2000	-
DEMs2 [kg]	-	500

RAEE

RECURSO

	Mesa de desensar	Triturado de plástico	Granulado de cable cobre
CAR [\$]	\$ 22.50	\$ 58.33	\$ 125.00
CAD [seg]	28800	28800	28800
CMR [rec]	4	1	1
CPT [\$]	\$ 0.00145	\$ 0.00013	\$ 0.00192

ETAPA

<i>DIA</i>	0	1	2	3
<i>TAM</i>	20	20	20	20
	0	3	3	3

Nota: En las Salidas se encuentran elementos que se llaman igual que los RAEE de entrada, esto se debe a que son equipos que se les ha realizado pequeños procesamientos, los mismos que son vendidos como equipos completos. Se diferencian de las salidas por un “*” colocado antes del RAEE correspondiente.

PARAMETROS CORRESPONDIENTES A LOS SUBPRODUCTOS

CINC [\$]	DEM [kg]	PVS [\$]	CIS [\$]	IS [kg]	CSS [kg]	
\$ 0.51	0	\$ 0.34	0.009884	10000	0	*PC/Servidor
\$ 2.15	0	\$ 1.43	0.28167	10000	0	*Portátil
\$ 0.15	0	\$ 0.10	0.005235	10000	0	*Monitor de PC CRT
\$ 0.60	0	\$ 0.40	0.22968	10000	0	*Monitor de PC FPD
\$ 0.33	0	\$ 0.22	0.01179	10000	0	*Impresora
\$ 0.15	0	\$ 0.10	0.08611	10000	0	*Accesorios informáticos
\$ 7.50	0	\$ 5.00	2.23362	10000	0	*Teléfono móvil
\$ 0.38	0	\$ 0.25	0.1928	10000	0	*Cocina SHA
\$ 0.38	0	\$ 0.25	0.29955	10000	0	*Plancha
\$ 0.38	0	\$ 0.25	0.0388	10000	0	*Aparatos de audio
\$ 0.38	0	\$ 0.25	0.11131	10000	0	*Aparatos de video
\$ 0.15	0	\$ 0.10	0.00165	10000	0	*TV CRT
\$ 0.60	0	\$ 0.40	0.12003	10000	0	*TV FPD
\$ 1.20	20	\$ 0.80	0.02227	5054	0	Aluminio
\$ 0.30	20	\$ 0.20	0.0021	14740	0	Hierro/Acero
\$ 8.25	20	\$ 5.50	0.0196	16773	0	Cobre
\$ 8.03	20	\$ 5.35	1.843881	12729	0	Imán de neodimio
\$ 5.25	20	\$ 3.50	29.01710	16342	0	Bronce/Latón
\$ 1.32	20	\$ 0.88	0.365968	14508	0	Acero inoxidable
\$ 0.15	20	\$ 0.10	0.00278	2658	0	Plásticos
\$ 0.21	20	\$ 0.14	0.0257	4007	0	Cable sin conectores/enchufes
\$79.9	20	\$ 53.30	0.441348	91094	0	Procesadores
\$10.2	20	\$ 6.80	0.01673	31200	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q1
\$ 6.00	20	\$ 4.00	0.07573	31200	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q2
\$ 3.00	20	\$ 2.00	0.0452	31200	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q3
\$ 0.44	20	\$ 0.29	0.0331	6545	0	Motores/Inductores/Transformadores
\$ 0.21	20	\$ 0.14	0.086	170	0	Chatarra mixta
\$ -	20	\$ (0.02)	0.382701	170	0	Residuos para disposición final
\$ -	20	\$ (0.97)	0.19137	20800	0	Baterías
\$ -	20	\$ (0.97)	0.219319	3466	0	Condensadores
\$ -	20	\$ (0.97)	0.172579	1376	0	Pantallas LCD
\$ -	20	\$ (0.97)	5.454690	93	0	Tubos fluorescentes/lámparas
\$ 0.00	20	\$ 0.00	0.04438	416	0	Cartuchos de impresora
						Vidrio

Los parámetros estocásticos, siguen una distribución de probabilidad uniforme se presentan los valores mínimos y máximos

**MIN de tiempo de
procesamiento [seg]**

MAX de tiempo de procesamiento [seg]

*Llegadas
esperadas de
RAEE*

	PC/Servidor	Portátil	Monitor de PC CRT	Monitor de PC FPD	Impresora	Accesorios informáticos	Teléfono móvil	Cocina SHA (cafetera)	Plancha	Aparatos de audio	Aparatos de video	TV CRT	TV FPD
<i>Mínimo posible de llegadas [und]</i>	169	160	62	116	84	622	4	1	1	1	7	17	1
<i>Máximo posible de llegadas [und]</i>	254	240	93	173	125	933	6	2	2	2	10	26	2

Las posibles cantidades de subproductos se presentan primero para el método de desensamble y luego para el método de venta directa

**Mínimo de CTD de
subproducto
obtenidos por el
método de
desensamblaje [kg]**

PC/Servidor	0.842	0.144	0.031	-	-	0.009	-	0.012	0.072	0.136	0.675	Aluminio
Portátil	6.885	0.929	0.363	0.474	0.151	0.005	0.107	0.770	1.800	0.121	5.053	Hierro/Acero
Monitor de PC FPD	0.122	0.077	0.084	0.007	0.023	0.007	0.038	0.051	0.056	0.091	0.304	Cobre
Impresora/Escáner/Copiadora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005	0.009	Imán de neodimio
Accesorios informáticos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.008	-	Bronce/Latón
Teléfono móvil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.025	0.043	Acerio inoxidable
Cocina SHA	3.703	0.360	1.314	0.535	1.269	0.074	0.662	2.066	0.927	0.696	0.752	Plásticos
Plancha	0.122	0.077	0.084	0.007	0.025	0.006	0.038	0.051	0.056	0.088	0.192	Cable sin conectores/enchufes
Aparatos de audio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.018	0.034	Procesadores
Aparatos de vídeo	0.842	-	-	-	-	0.028	-	-	0.248	0.353	0.838	Tarjeta de Circuito Impreso, Q1
TV FPD	-	0.212	-	-	-	-	0.013	0.065	-	0.005	0.026	Tarjeta de Circuito Impreso, Q2
	-	-	0.240	-	-	0.017	0.024	0.036	-	-	0.171	Tarjeta de Circuito Impreso, Q3
	0.260	0.288	0.293	-	-	0.042	-	0.117	0.018	0.030	0.094	Motores/Inductores/Transformadores
	0.520	0.113	0.293	0.328	0.783	0.006	0.017	0.158	0.261	0.398	0.265	Chatarra mixta
	0.337	0.023	0.008	-	-	-	0.081	0.131	0.015	-	-	Residuos para disposición final
	-	-	0.070	-	-	0.068	-	-	0.391	0.026	-	Baterías
	0.031	0.016	0.006	-	-	-	-	0.004	0.014	-	0.068	Condensadores
	0.949	0.014	0.006	-	-	0.007	-	0.004	0.374	0.139	-	Pantallas LCD
	0.138	-	-	-	-	-	-	0.008	0.014	0.003	-	Tubos fluorescentes/lámparas fluorescentes
	-	-	-	-	-	-	-	0.223	-	-	-	Cartuchos de impresora
	0.551	-	-	-	-	-	-	0.405	0.531	-	-	Vidrio

**Máximo de CTD de
subproducto
obtenidos por el
método de
desensamble [kg]**

<i>PC/Servidor</i>	1.029	0.176	0.038	-	0.011	-	0.015	0.088	0.166	0.826	Aluminio
<i>Portátil</i>	8.415	1.136	0.443	0.579	0.184	0.006	0.131	0.941	2.200	0.148	Hierro/Acero
<i>Monitor de PC FPD</i>	0.150	0.094	0.102	0.008	0.028	0.008	0.047	0.062	0.069	0.111	Cobre
<i>Impresora/Escáner/Copiadora</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	0.010	Imán de neodimio
<i>Accesorios informáticos</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.009	-	Bronce/Latón
<i>Teléfono móvil</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.031	0.052	Acero inoxidable
<i>Cocina SHA</i>	4.525	0.440	1.606	0.653	1.551	0.091	0.810	2.525	1.133	0.850	Plásticos
<i>Plancha</i>	0.150	0.094	0.102	0.008	0.030	0.008	0.047	0.062	0.069	0.108	0.235 Cable sin conectores/enchufes
<i>Aparatos de audio</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.022	0.042	Procesadores
<i>Aparatos de vídeo</i>	1.029	-	-	-	-	0.034	-	-	0.303	0.431	Tarjeta de Circuito Impreso, Q1
<i>TV FPD</i>	-	0.259	-	-	-	-	0.015	0.079	-	0.006	Tarjeta de Circuito Impreso, Q2
	-	0.293	-	-	0.021	0.030	0.045	-	-	0.209	Tarjeta de Circuito Impreso, Q3
	0.318	0.352	0.358	-	-	0.051	-	0.144	0.022	0.037	Motor/Inductores/Transformadores
	0.636	0.138	0.358	0.401	0.957	0.007	0.021	0.193	0.319	0.487	Chatarra mixta
	0.411	0.028	0.010	-	-	-	0.099	0.160	0.018	-	Residuos para disposición final
	-	0.085	-	-	0.083	-	-	-	0.477	0.031	Baterías
	0.037	0.019	0.007	-	-	-	0.005	0.017	-	0.084	Condensadores
	1.159	0.017	0.007	-	-	0.009	-	0.005	0.457	0.169	- Pantallas LCD
	0.168	-	-	-	-	-	-	0.010	0.017	0.003	- Tubos fluorescentes/lámparas fluorescentes
	-	-	-	-	-	-	-	0.272	-	-	- Cartuchos de impresora
	0.673	-	-	-	-	-	-	0.495	0.649	-	- Vidrio

*Mínimo de CTD de
subproductos
obtenidos por el
método de Venta
Directa [kg]*

Anexo D: Mix de procesamiento para simulación de cada escenario

	PC/Servidor	Portátil	Monitor de PC CRT	Monitor de PC FPD	Impresora	Accesorios informáticos	Teléfono móvil	Cocina SHA	Plancha	Aparatos de audio	Aparatos de vídeos	TV CRT	TV FPD
<i>DESENSAMBLE [und]</i>													
<i>Flexsim Óptimo</i>	98	7	0	20	199	62	0	0	0	36	19	0	4
<i>Escenario 1</i>	16	1	0	6	114	46	0	2	14	25	7	0	3
<i>Escenario 2</i>	75	1	0	13	89	2	2	8	1	11	8	0	3
<i>Escenario 3</i>	20	0	0	5	32	26	4	1	10	23	10	0	2
<i>Escenario 4</i>	61	0	0	11	96	8	1	9	11	28	4	0	1
<i>Escenario 5</i>	2	1	0	5	150	31	3	2	11	4	0	0	3
<i>VENTA DIRECTA [und]</i>													
<i>Flexsim Óptimo</i>	0	0	114	0	5	0	7	10	15	0	0	110	0
<i>Escenario 1</i>	32	0	3	11	90	16	0	5	0	2	6	95	1
<i>Escenario 2</i>	18	0	107	6	40	53	2	2	3	20	4	96	0
<i>Escenario 3</i>	65	4	22	2	138	24	3	9	4	2	6	106	2
<i>Escenario 4</i>	37	7	114	9	108	54	6	1	4	8	15	110	3
<i>Escenario 5</i>	96	6	114	15	54	31	4	8	4	32	19	110	1

Anexo E: Resultados obtenidos de cada Simulación

Se presenta la cantidad de subproductos obtenidos, en kilogramos, en cada uno de las simulaciones de los distintos escenarios.

					Número de
					1
					2
Flexsim Óptimo	6	5	4	3	1
	-	-	-	-	*PC/Servidor
	-	-	-	-	*Portátil
1953.32	1955.67	1955.18	1944.38	1930.66	1929.04 *Monitor de PC CRT
-	-	-	-	-	*Monitor de PC FPD
915.81	914.28	920.50	918.23	916.57	914.72 *Impresora
-	-	-	-	-	*Accesorios informáticos
2.11	2.18	2.17	2.10	2.11	2.17 *Teléfono móvil
24.78	25.46	24.94	24.73	25.68	25.17 *Cocina SHA
-	-	-	-	-	*Plancha
-	-	-	-	-	*Aparatos de audio
-	-	-	-	-	*Aparatos de video
4333.87	4317.75	4326.46	4319.76	4295.13	4284.60 *TV CRT
-	-	-	-	-	*TV FPD
84.42	84.47	84.10	84.12	83.64	84.16 Aluminio
668.50	670.78	666.45	669.42	679.00	670.53 Hierro/Acero
43.51	43.25	43.26	43.31	43.53	43.24 Cobre
0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97 Imán de neodimio
0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06 Bronce/Latón
4.90	4.90	4.87	4.87	4.86	4.81 Acero inoxidable
239.86	239.36	238.30	239.55	238.61	238.03 Plásticos
31.14	31.21	31.20	31.05	31.14	31.24 Cable sin conectores/enchufes
3.86	3.85	3.86	3.89	3.87	3.86 Procesadores
103.97	103.14	103.87	103.81	103.83	103.82 Tarjeta de Circuito Impreso, Q1
8.15	8.12	8.22	8.04	8.07	8.09 Tarjeta de Circuito Impreso, Q2
29.93	29.77	29.94	29.98	29.77	30.06 Tarjeta de Circuito Impreso, Q3
29.71	29.66	29.85	29.87	29.88	29.73 Motores/Inductores/Transformad
60.87	60.14	60.64	60.56	60.72	60.29 Chatarra mixta
5.25	5.25	5.38	5.37	5.24	5.29 Residuos para disposición final
8.64	8.62	8.60	8.56	8.61	8.69 Baterías
8.42	8.43	8.41	8.46	8.45	8.44 Condensadores
13.96	14.16	14.04	14.32	14.33	13.92 Pantallas LCD
0.94	0.92	0.96	0.93	0.92	0.91 Tubos fluorescentes/lámparas
-	-	-	-	-	- Cartuchos de impresora
14.33	14.11	14.07	14.27	14.37	14.27 Vidrio

Flexsim Óptimo	Escenar io 1	1	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7
			305.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	51.17	1934.53	1923.52	1930.57	1939.52	1949.09	1956.44	1945.09	1948.65	1946.29	1952.01	-
		55.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	405.63	917.33	914.40	922.54	922.86	920.88	919.53	916.43	918.23	918.21	919.66	-
		16.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	12.76	2.11	2.13	2.09	2.05	2.08	2.13	2.11	2.16	2.14	2.13	-
		25.15	25.04	25.47	25.24	25.01	24.35	25.10	24.93	25.38	25.98	-
Flexsim Óptimo	6.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		14.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	3685.18	4247.52	4303.10	4276.00	4288.89	4274.50	4299.04	4321.25	4254.28	4282.68	4330.78	-
		16.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	18.72	84.36	83.28	84.46	83.85	84.71	84.42	84.56	83.50	83.57	84.32	-
		252.66	668.43	668.76	664.02	675.02	672.52	675.21	670.40	670.80	674.26	667.05
Flexsim Óptimo	0.16	43.25	42.98	43.08	43.06	43.05	43.28	43.12	43.03	43.37	43.33	-
		0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	-
Flexsim Óptimo	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	-
		0.79	4.86	4.88	4.87	4.87	4.88	4.85	4.91	4.86	4.88	4.87
Flexsim Óptimo	381.06	238.38	239.97	241.28	240.23	239.42	238.02	239.80	240.77	239.80	238.49	-
		15.58	31.20	31.07	31.10	31.33	31.23	31.03	30.93	31.07	31.05	-
Flexsim Óptimo	0.64	3.88	3.90	3.88	3.85	3.86	3.84	3.87	3.89	3.85	3.86	-
		19.37	103.16	102.99	102.57	103.03	103.10	103.37	103.15	102.08	103.06	103.81
Flexsim Óptimo	10.91	8.05	8.26	8.21	8.17	8.20	8.24	8.22	8.23	8.27	8.23	-
		15.53	29.86	29.79	29.96	29.92	30.07	29.98	30.10	29.99	30.02	29.90
Flexsim Óptimo	27.81	29.79	29.80	29.86	29.68	29.87	29.60	29.90	30.05	29.97	29.96	-
		45.29	60.87	60.64	60.67	60.60	60.48	60.72	61.08	60.74	60.93	60.56
Flexsim Óptimo	12.60	5.24	5.32	5.33	5.29	5.37	5.30	5.22	5.33	5.31	5.27	-
		2.82	8.69	8.63	8.64	8.63	8.69	8.66	8.79	8.57	8.59	8.76
Flexsim Óptimo	6.58	8.47	8.42	8.37	8.46	8.39	8.39	8.50	8.44	8.43	8.48	-
		14.18	13.99	13.98	14.00	14.06	14.10	13.90	14.03	14.20	14.23	-
Flexsim Óptimo	1.56	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.93	0.92	0.94	0.94	0.91	-
		28.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flexsim Óptimo	57.06	14.31	14.10	14.34	14.26	14.01	14.19	14.44	14.41	14.39	14.09	-

| Escenario 1 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 16 | 15 | 14 | 13 | | | | | | |
| 169.15 | 171.40 | 169.75 | 171.17 | 170.91 | 168.25 | 173.49 | 295.83 | 309.58 | 306.68 | 302.60 | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| 1805.38 | 1834.87 | 1835.21 | 1827.31 | 1826.44 | 1830.63 | 1833.32 | 55.35 | 49.51 | 50.02 | 48.08 | | | | | | |
| 30.03 | 29.84 | 30.72 | 29.68 | 30.30 | 29.90 | 28.69 | 53.95 | 54.58 | 54.88 | 54.54 | | | | | | |
| 180.45 | 181.52 | 178.51 | 177.98 | 183.02 | 182.46 | 182.42 | 403.93 | 406.01 | 404.74 | 403.02 | | | | | | |
| 53.00 | 53.33 | 52.93 | 53.04 | 53.20 | 53.54 | 52.85 | 16.15 | 16.12 | 16.01 | 15.94 | | | | | | |
| 0.60 | 0.61 | 0.66 | 0.60 | 0.60 | 0.62 | 0.55 | - | - | - | - | | | | | | |
| 5.23 | 5.14 | 4.72 | 4.61 | 4.59 | 4.88 | 4.82 | 12.89 | 12.13 | 12.52 | 12.50 | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| 61.73 | 62.55 | 61.65 | 61.88 | 61.76 | 61.58 | 61.60 | 6.66 | 6.21 | 6.36 | 5.76 | | | | | | |
| 2.55 | 2.46 | 2.66 | 2.30 | 2.60 | 2.67 | 2.30 | 15.11 | 15.42 | 15.80 | 15.65 | | | | | | |
| 3790.59 | 3715.08 | 3788.07 | 3723.24 | 3736.22 | 3738.23 | 3726.07 | 3720.85 | 3732.44 | 3727.52 | 3675.79 | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | 15.60 | 15.84 | 18.21 | 16.59 | | | | | |
| 63.47 | 63.55 | 62.84 | 63.33 | 63.31 | 63.43 | 62.62 | 18.90 | 18.98 | 18.63 | 18.98 | | | | | | |
| 564.71 | 561.50 | 555.63 | 561.56 | 563.66 | 563.89 | 563.25 | 253.94 | 253.94 | 250.51 | 253.47 | 250.51 | | | | | |
| 32.98 | 32.79 | 32.64 | 32.86 | 32.96 | 33.03 | 32.69 | 17.59 | 17.83 | 17.82 | 17.81 | | | | | | |
| 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | | | | | |
| 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | | | |
| 3.61 | 3.61 | 3.61 | 3.62 | 3.59 | 3.61 | 3.61 | 3.63 | 0.80 | 0.78 | 0.77 | 0.78 | | | | | |
| 307.89 | 307.13 | 308.62 | 310.08 | 307.94 | 308.34 | 309.32 | 380.84 | 379.76 | 378.82 | 380.42 | | | | | | |
| 23.71 | 23.60 | 23.52 | 23.59 | 23.74 | 23.60 | 23.65 | 15.77 | 15.77 | 15.77 | 15.76 | 15.63 | | | | | |
| 2.89 | 2.86 | 2.87 | 2.88 | 2.89 | 2.91 | 2.89 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.64 | 0.64 | | | | | |
| 76.69 | 76.01 | 77.01 | 76.18 | 76.41 | 76.22 | 76.72 | 19.61 | 19.64 | 19.76 | 19.62 | | | | | | |
| 11.20 | 11.17 | 11.26 | 11.21 | 11.15 | 11.12 | 11.08 | 10.93 | 10.97 | 10.91 | 10.88 | | | | | | |
| 18.38 | 18.20 | 18.13 | 18.11 | 18.28 | 18.04 | 18.15 | 15.66 | 15.55 | 15.64 | 15.41 | | | | | | |
| 24.68 | 24.48 | 24.52 | 24.62 | 24.36 | 24.22 | 24.57 | 28.01 | 28.08 | 28.13 | 27.98 | | | | | | |
| 50.24 | 49.76 | 5- | 50.04 | 50.08 | 50.08 | 50.53 | 45.20 | 45.71 | 45.44 | 45.37 | | | | | | |
| 11.43 | 11.36 | 11.36 | 11.34 | 11.40 | 11.40 | 11.34 | 12.70 | 12.57 | 12.72 | 12.80 | | | | | | |
| 2.81 | 2.80 | 2.83 | 2.82 | 2.76 | 2.81 | 2.82 | 2.77 | 2.87 | 2.84 | 2.79 | | | | | | |
| 6.60 | 6.60 | 6.59 | 6.61 | 6.60 | 6.62 | 6.62 | 2.16 | 2.18 | 2.19 | 2.17 | | | | | | |
| 9.33 | 9.44 | 9.20 | 9.39 | 9.35 | 9.29 | 9.43 | 6.56 | 6.63 | 6.66 | 6.44 | | | | | | |
| 1.45 | 1.47 | 1.45 | 1.44 | 1.45 | 1.46 | 1.45 | 1.60 | 1.56 | 1.56 | 1.59 | | | | | | |
| 22.14 | 22.00 | 21.94 | 22.23 | 22.01 | 22.06 | 22.08 | 28.13 | 28.22 | 28.16 | 28.33 | | | | | | |
| 49.80 | 49.33 | 49.33 | 49.64 | 49.37 | 49.74 | 49.95 | 56.48 | 57.16 | 56.55 | 56.41 | | | | | | |

Escenario		Caso 3	
Escenario		Caso 3	
Escenario		Caso 3	
		6	7
		8	9
	10	11	12
	13	12	11
	10	9	8
	9	8	7
	8	7	6
	7	6	5
	6	5	4
	5	4	3
615.04	619.72	621.19	613.60
11.42	10.96	11.14	11.40
372.16	373.93	375.51	381.05
10.57	10.73	9.76	10.40
614.31	627.07	622.49	621.30
0.86	0.90	0.88	0.87
23.62	21.61	22.52	22.31
6.08	5.91	6.22	5.95
6.21	6.38	6.17	6.29
14.59	15.68	14.95	14.39
4112.66	4196.17	4154.52	4104.59
34.82	34.15	31.80	33.82
20.44	20.29	20.10	20.33
192.72	194.68	191.07	194.21
13.26	13.29	13.42	13.34
0.19	0.19	0.19	0.19
-	-	-	-
0.94	0.97	0.94	0.96
167.33	168.59	168.48	168.49
10.77	10.90	11.00	10.79
0.77	0.75	0.75	0.77
22.25	21.83	22.24	22.53
5.61	5.62	5.53	5.61
12.07	12.02	11.95	12.19
17.87	17.58	17.92	17.93
27.75	27.95	27.82	27.80
4.83	4.74	4.81	4.81
2.63	2.69	2.63	2.67
2.08	2.12	2.12	2.13
4.65	4.47	4.68	4.70
0.69	0.65	0.66	0.68
8.09	7.85	7.80	7.89
18.61	18.42	18.49	18.44

Escenario		io 3		14	
Escenario		io 3		15	
Escenario		io 3		16	
8	7	6	5	4	3
351.31	346.60	351.66	345.97	353.05	349.78
19.07	19.78	19.95	19.87	19.25	19.61
1935.80	1934.98	1937.18	1922.23	1947.32	1933.72
43.58	42.53	46.75	45.76	44.53	43.70
479.39	485.81	489.00	486.16	483.61	485.32
53.60	54.11	54.28	54.53	54.33	54.68
1.81	1.91	1.79	1.79	1.84	1.88
2.49	2.55	2.43	2.41	2.62	2.52
5.83	5.76	6.08	5.79	6.11	5.83
25.38	25.19	25.46	24.57	24.28	24.58
38.38	37.61	37.64	37.75	37.87	37.69
4256.60	4274.11	4241.44	4305.10	4310.96	4263.42
50.68	50.65	48.96	49.51	47.49	50.24
50.25	50.48	50.59	49.79	50.78	49.78
4777.79	479.90	478.47	477.94	478.41	480.11
30.11	30.50	30.36	30.47	30.38	30.56
0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
-	-	-	-	-	-
2.88	2.91	2.87	2.88	2.90	2.89
354.13	351.88	353.79	356.48	354.58	351.96
22.81	23.08	22.92	22.83	22.86	23.00
2.31	2.30	2.32	2.34	2.30	2.33
60.31	60.81	61.31	60.72	61.07	60.47
9.73	9.75	9.74	9.68	9.68	9.65
23.28	23.02	23.48	23.12	22.93	23.00
29.66	29.72	29.91	30.04	29.81	29.79
59.86	60.20	60.28	60.23	60.33	59.94
11.04	10.86	10.99	11.01	10.93	10.87
3.99	3.97	3.94	4.05	4.01	3.97
5.49	5.53	5.52	5.51	5.56	5.52
6.35	6.23	6.12	6.33	6.30	6.22
1.20	1.19	1.17	1.18	1.17	1.19
23.74	23.87	23.82	23.77	23.69	23.49
50.07	50.63	49.99	50.06	50.26	5-

<i>Escenario 5</i>	15	893.30	889.78
<i>Escenario 5</i>	16	16.94	17.06
		1933.44	1925.82
		75.75	76.36
		244.28	244.12
		30.83	31.75
		1.14	1.21
		19.84	19.80
		6.09	5.78
		100.40	99.31
		47.97	47.60
		4286.81	4253.05
		18.67	18.66
		7.23	6.95
		183.91	183.48
		11.87	11.80
		0.03	0.02
		0.01	0.01
		0.13	0.13
		399.74	400.12
		11.58	11.61
		0.10	0.09
		6.44	6.67
		11.26	11.31
		8.44	8.43
		22.38	22.41
		38.38	38.15
		15.31	15.44
		1.02	1.00
		1.03	1.02
		6.17	6.09
		1.89	1.86
		36.84	37.00
		72.21	71.90

Anexo F: Datos iniciales de los escenarios correspondientes a cada mes

Solamente cambian los valores de stocks iniciales de entrada y salida.

Stock Inicial de Entrada [und]

	PC/Servidor	Portátil	Monitor de PC CRT	Monitor de PC FPD	Impresora	Accesorios informáticos	Teléfono móvil	Cocina SHA	Plancha	Aparatos de audio	Aparatos de video	TV CRT	TV FPD
Mes 1	98	7	114	20	204	62	7	10	15	36	19	110	4
Mes 2	203	229	89	170	100	820	5	2	2	1	8	25	1
Mes 3	227	218	83	166	99	661	4	2	2	1	8	24	1
Mes 4	170	173	71	136	122	827	5	2	2	2	9	17	2
Mes 5	218	211	77	140	92	647	6	1	1	2	9	22	1
Mes 6	205	228	85	159	85	651	5	1	2	2	9	22	1

Se registran únicamente los stocks para los cuales el valor es diferente de 0

Stock Inicial de Subproductos [kg]

Mes 1	8.283	5.940	3.490	1.028	0	Imán de neodimio							
Mes 2	2.612	1.613	0.830	0.056	0	Bronce/Latón							
Mes 3	2.843	10.530	17.735	4.972	0	Acero inoxidable							
Mes 4	11.421	2.315	12.825	3.936	0	Procesadores							
Mes 5	226.539	318.143	9.686	112.873	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q1							
	4.219	21.510	4.972	8.390	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q2							
	0.000	61.358	0.000	30.824	0	Tarjeta de Circuito Impreso, Q3							
	0.000	0.000	0.000	5.642	0	Residuos para disposición final							
	152.592	95.479	51.788	8.467	0	Baterías							
	62.771	46.818	26.439	8.593	0	Condensadores							
	256.241	174.091	93.366	14.874	0	Pantallas LCD							
	9.049	6.417	3.770	0.932	0	Tubos fluorescentes/lámparas fluorescentes							
	0.000	0.000	0.000	14.741	0	Vidrio							