

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3209>

Selección de funciones relevantes en la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) basado en el Proceso de Análisis Jerárquico

Selection of relevant functions in the management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) based on the Hierarchical Analysis Process

Bryan Alexander Lundberg Jiménez

M16010924@orizaba.tecnm.mx
<https://orcid.org/0009-0002-0303-4567>
Tecnológico Nacional de México
Orizaba – México

Guillermo Cortés Robles

guillermo.cr@orizaba.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0001-8857-7143>
Tecnológico Nacional de México
Orizaba – México

Víctor Ricardo Castillo Intriago

victor.ci@orizaba.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2931-4914>
Tecnológico Nacional de México
Orizaba – México

Eduardo Roldán Reyes

eduardo.rr@orizaba.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-4212-1586>
Tecnológico Nacional de México
Orizaba – México

José Luis Sánchez Cervantes

jose.sc@orizaba.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0001-5194-1263>
Tecnológico Nacional de México
Orizaba – México

Artículo recibido: 12 de diciembre de 2024. Aceptado para publicación: 28 de diciembre de 2024.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Este estudio aplica el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como herramienta metodológica para identificar y priorizar funciones clave en el diseño de un sistema administrativo destinado a la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Esta evaluación previa es fundamental para orientar la conceptualización y especificación de los requerimientos del sistema antes de su implementación. Los resultados obtenidos permitieron jerarquizar criterios y subcriterios esenciales, destacando la reparación y el desmantelamiento como actividades críticas debido a su influencia directa en la recuperación económica y la sostenibilidad del ciclo de vida de los dispositivos. Asimismo, subcriterios como la contribución al reciclaje, la sostenibilidad y la transparencia fueron identificados como factores prioritarios, reflejando la necesidad de integrar consideraciones técnicas, económicas y éticas en el desarrollo del sistema. Estos hallazgos proporcionan un marco estratégico claro para la toma de decisiones, estableciendo las bases para la creación de un Producto Mínimo Viable (MVP) optimizado para gestionar eficazmente los RAEE, con un enfoque en la economía circular


y la valorización sostenible de los recursos.

Palabras clave: proceso analítico jerárquico (AHP), decisión multicriterio, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

Abstract

This study employs the Analytical Hierarchy Process (AHP) to identify and prioritize key functions in the design of an administrative system for the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). This preliminary evaluation is essential for guiding the conceptualization and specification of system requirements prior to implementation. The results highlight repair and dismantling as critical activities due to their significant impact on economic recovery and the sustainability of the device lifecycle. Additionally, sub-criteria such as contribution to recycling, sustainability, and transparency were identified as priority factors, emphasizing the importance of integrating technical, economic, and ethical considerations into the system's development. These findings offer a clear strategic framework for decision-making, laying the foundation for the creation of an optimized Minimum Viable Product (MVP) for effective WEEE management, with a focus on circular economy principles and the sustainable valorization of resources.

Keywords: analytic hierarchy process (AHP), multicriteria decision-making, waste electrical and electronic equipment (WEEE)

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Lundberg Jiménez, B. A., Cortés Robles, G., Castillo Intriago, V. R., Roldán Reyes, E., & Sánchez Cervantes, J. L. (2024). Selección de funciones relevantes en la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) basado en el Proceso de Análisis Jerárquico. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 5 (6), 2850 – 2161.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3209>

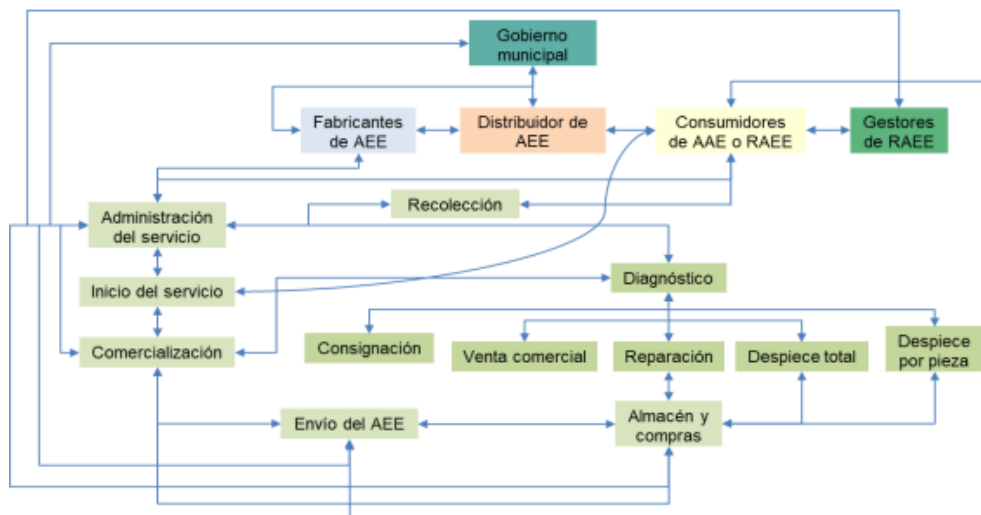
INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representa una preocupación global que exige acciones estratégicas y efectivas. La rápida obsolescencia de dispositivos electrónicos, combinada con el vertiginoso avance tecnológico, ha provocado un aumento significativo en los volúmenes de generación de RAEE, alcanzando una cifra histórica de 62 millones de toneladas en 2022 (Baldé et al., 2024). Este fenómeno no solo plantea un desafío ambiental, sino que también abre una oportunidad para fomentar la creación de valor mediante la economía circular (Corona & Cortés, 2024).

En este contexto, la investigación sobre modelos orientados a la gestión de RAEE adquiere una importancia crucial. Para abordar esta problemática, Corona & Cortés (2024) propone un modelo de negocio que busca beneficiar a la sociedad a través de la producción sostenible de servicios centrados en los RAEE. Este enfoque promueve la reutilización, el manejo adecuado de los residuos, la maximización de su valor y la minimización del impacto ambiental (Gráfico 1).

Figura 1

Esquema de producción de servicios RAEE (Corona & Cortes, 2024)



La propuesta presentada ilustra un esquema integral para la gestión de RAEE, estructurado en torno a diversas funciones clave. Estas funciones incluyen actividades como la comercialización, consignación, reparación, despiece (tanto total por material como por pieza o componente), donativos y mantenimiento. Todas ellas se interrelacionan con el objetivo de maximizar el valor económico y reducir el impacto ambiental asociado a los residuos electrónicos.

Para validar este modelo, se plantea la necesidad de desarrollar un Producto Mínimo Viable (MVP) en forma de software administrativo. La implementación de este software representa un paso esencial para priorizar aquellas actividades que generen mayor valor en las etapas iniciales del proyecto. Dicha selección estratégica se realiza mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Este método permite evaluar y priorizar las funciones según su contribución al logro de objetivos clave: la reducción de residuos, la recuperación de valor económico y la sostenibilidad general. De esta forma, se busca garantizar que los recursos invertidos en el desarrollo del MVP generen un impacto significativo y alineado con los objetivos del modelo (Nantes, 2019).

METODOLOGÍA

Dado el carácter exploratorio de esta investigación, se recurrió a debates semiestructurados con un grupo de expertos en gestión de RAEE para definir los primeros criterios de análisis y contextualizar su aplicación (Lercher et al., 2024). Estos expertos fueron seleccionados en número impar por su experiencia y trayectoria en el diseño de servicios, logística inversa y economía circular. Durante estos debates, se permitió a los participantes expresar sus ideas y preferencias mientras se mantenía un enfoque dirigido. Este enfoque ayudó a comprender las razones detrás de sus elecciones, las cuales se registraron como votaciones en cada etapa del ejercicio. El enfoque metodológico empleado se estructuró en cinco fases interrelacionadas:

Construcción del modelo jerárquico: Se definieron los servicios clave y sus respectivos criterios de evaluación.

Presentación de la escala de evaluación: Se empleó una escala basada en el método AHP para establecer comparaciones consistentes.

Construcción de las matrices de comparación: Se desarrollaron matrices para evaluar la importancia relativa de los criterios y subcriterios.

Análisis de consistencia lógica: Se verificó la coherencia de las comparaciones realizadas por los expertos.

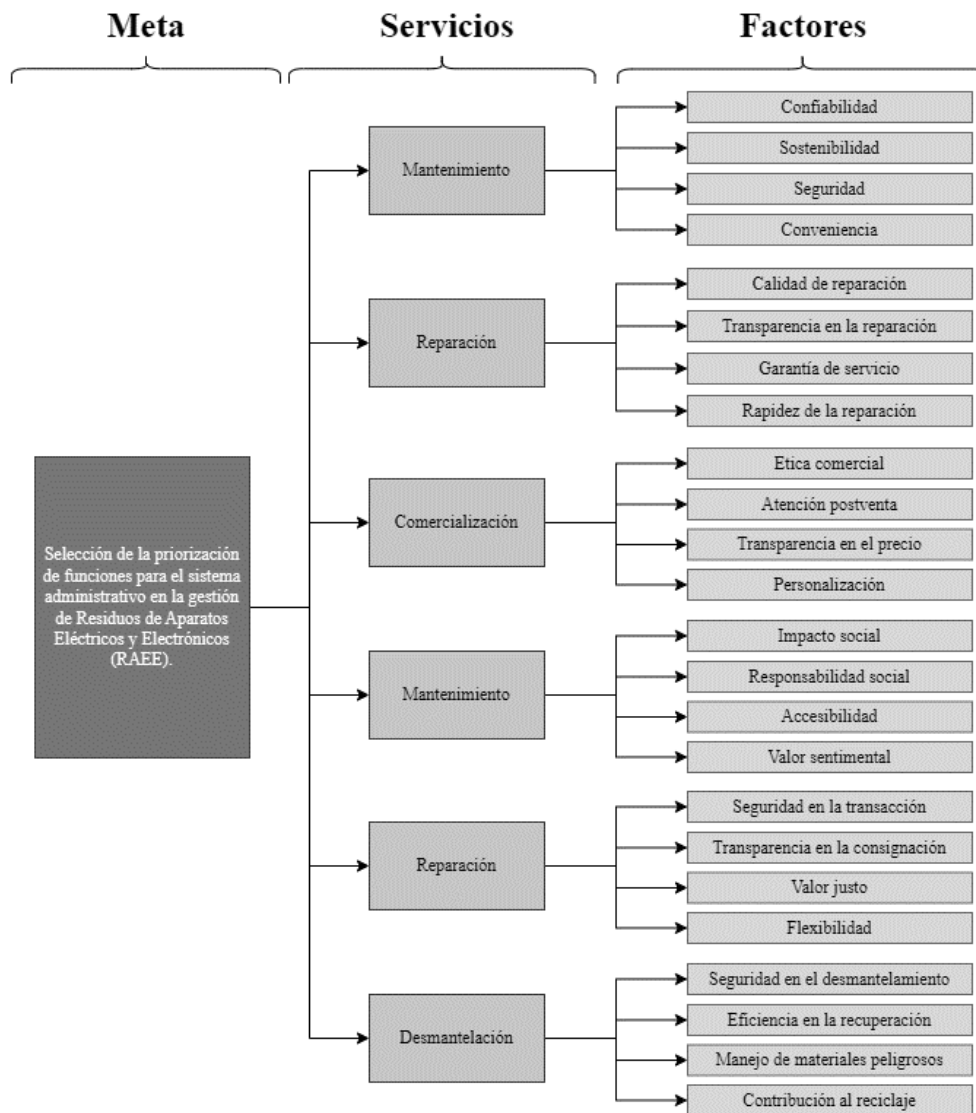
Validación de la consistencia: Se le añade un factor de aleatoriedad para determinar el grado de consistencia en los pesos normalizados.

Construcción del modelo jerárquico

El modelo jerárquico (Fig. 2) se diseñó para facilitar la selección de criterios con base en la adopción de servicios específicos. Cada servicio identificado incluye un conjunto de preceptos que permiten su valoración y comparación. Estos preceptos, derivados del modelo propuesto por Cortés (2024), representan las necesidades clave del mercado y determinan el alcance del servicio.

Figura 2

Modelo jerárquico de criterios y subcriterios para la selección de funciones



Aunque todos los preceptos son esenciales para la prestación de los servicios, es necesario priorizarlos. Esta jerarquía es fundamental para orientar la implementación del Producto Mínimo Viable (MVP) y optimizar los recursos disponibles. Los criterios secundarios proporcionan una estructura adicional para esta clasificación y permiten evaluar la relevancia de cada función en el contexto.

Presentación de la escala

La evaluación realizada por los expertos se basó en la escala fundamental propuesta por el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Saaty (1977). Esta metodología proporciona un enfoque estructurado para la comparación de criterios, garantizando coherencia lógica en la priorización de alternativas. La escala utilizada, ampliamente reconocida en estudios similares (Tabla 1).

Tabla 1

Escala fundamental del Proceso de Análisis Jerárquico (Vargas & St, 2022, pag 6)

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen igual al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y juicio es ligeramente a favor de una actividad que la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y juicio es fuertemente a favor de una actividad que la otra
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Es una actividad que favorece muy fuertemente sobre la otra, su dominancia está demostrada en la practica
9	Extrema importancia	La evidencia favorece una actividad sobre la otra, es la afirmación valorable más alta.
Recíprocos	Inverso de la comparación	Si se tuviera que forzar la consistencia obteniendo n valores numéricos para abarcar la matriz
Valores intermedios	Valores intermedios (2,4,6,8)	Valores intermedios entre los anteriores, usados cuando se necesita un compromiso.

Esta escala permitió a los expertos realizar comparaciones de pares entre los criterios y subcriterios identificados en el modelo jerárquico (Fig. 2). Posteriormente, los valores obtenidos se utilizaron para construir las matrices de comparación, asegurando una base sólida para el análisis de consistencia y la determinación de prioridades.

Construcción de las matrices de comparación

Siguiendo un proceso iterativo con los expertos y empleando la escala de pesos relativos del AHP descrita previamente, se asignaron calificaciones de importancia a cada criterio principal (Tabla 2). Este procedimiento se replicó para todos los subcriterios.

Tabla 2

Matriz de comparación de criterios de selección primarios

	Consignación	Reparación	Comercialización	Donación	Desmantelación	Mantenimiento
Consignación	1	1/3	1	1	1/3	1/3
Reparación	3	1	3	3	1	3
Comercialización	1	1/3	1	1	1/3	1
Donación	1	1/3	1	1	1/5	1/3
Desmantelación	3	1	3	5	1	1
Mantenimiento	3	1/3	1	3	1	1

La asignación de pesos relativos fue realizada por expertos en economía circular, logística inversa y diseño de servicios.

Posteriormente, la matriz fue normalizada para garantizar que la suma de cada columna equivaliera a un valor uniforme de 1 (Tabla 3). Esto permitió obtener un modelo consistente y compatible con la metodología AHP.

Tabla 3

Validación de resultados de la matriz de selección primaria

	Consignación	Reparación	Comercialización	Donación	Desmantelación	Mantenimiento
Consignación	0.0833	0.1000	0.1000	0.0714	0.0862	0.0500
Reparación	0.2500	0.3000	0.3000	0.2143	0.2586	0.4500
Comercialización	0.0833	0.1000	0.1000	0.0714	0.0862	0.1500
Donación	0.0833	0.1000	0.1000	0.0714	0.0517	0.0500
Desmantelación	0.2500	0.3000	0.3000	0.3571	0.2586	0.1500
Mantenimiento	0.2500	0.1000	0.1000	0.2143	0.2586	0.1500
Suma de columna	1	1	1	1	1	1

Este proceso estructurado garantiza consistencia en las prioridades establecidas, facilitando la interpretación y el análisis de los resultados en las siguientes fases de la investigación.

Análisis de consistencia lógica

En esta etapa, se realizó el cálculo del índice de consistencia lógica (IC) para validar la coherencia de las comparaciones en la matriz de selección primaria. Este análisis permite identificar inconsistencias en las prioridades asignadas, lo que asegura que las decisiones tomadas sean fiables. Los resultados se presentan a continuación (Tabla 4).

Tabla 4

Índices de consistencia y pesos normalizados para la evaluación

	Sumatoria	Wi	%	Orden
Consignación	0.4910	0.0818	8.18%	5
Reparación	1.7729	0.2955	29.55%	1
Comercialización	0.5910	0.0985	9.85%	4
Donación	0.4565	0.0761	7.61%	6
Desmantelación	1.6158	0.2693	26.93%	2
Mantenimiento	1.0729	0.1788	17.88%	3
	6		100.00%	

Nota: Wi: Es el peso normalizado; %: Es el peso normalizado porcentual.

Validación de la consistencia

El índice de consistencia aleatorio (RCI) correspondiente al tamaño de la matriz (6 opciones) se obtuvo de la Tabla 5, con un valor correspondiente del 1.24. A partir de este valor, se calculó el factor del índice de consistencia (IC), que es un indicador clave para determinar la consistencia de las comparaciones realizadas y garantizar que las ponderaciones realizadas por los expertos se mantuvieron dentro de un margen de error controlado.

Criterio de aceptación: Para que las comparaciones sean aceptables, el valor de la razón de consistencia (RCI) debe estar dentro del rango permitido: $0 \leq RCI \leq 0.10$.

Tabla 5

Índice de consistencia aleatorio (Saaty, 1977)

M*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI†	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Nota: M*: Número de opciones; RI†: Índice aleatorio

Como se presenta en la Tabla 6, el factor de consistencia se mantuvo dentro del margen permitido por lo que la propuesta de los expertos es aceptada con una consistencia del 4.04% indicando que las comparaciones emitidas por los expertos son sólidas.

Tabla 6

Resultados del Análisis de Consistencia

λ máx	6.2504
IC	0.0501
RCI	0.0404

Índice de Consistencia (IC) y Razón de Consistencia Aleatoria (RCI)

Si los resultados hubieran superado el límite aceptable, el proceso habría requerido recalibraciones iterativas hasta alcanzar la consistencia deseada. Dicha metodología se repitió de la misma manera a modo de desarrollar los criterios secundarios.

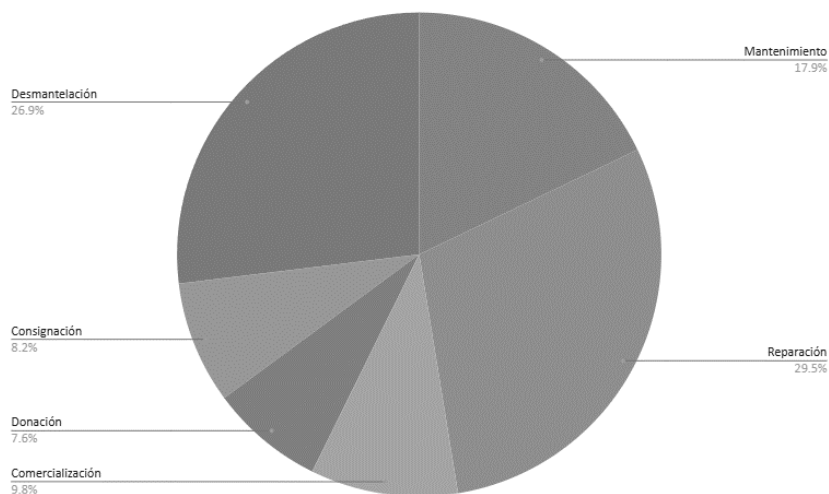
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos identifican los servicios más relevantes y sus preceptos asociados, en función de su importancia relativa. Este análisis permitió priorizar los criterios y subcriterios para el desarrollo inicial.

Debido a nuestro índice de consistencia logró un valor del 0.04 podemos estar seguros de que los resultados que se desglosan de este cálculo se mantienen coherentes, tal como se muestra en el gráfico 1, en el primer nivel de la jerarquía, el criterio que obtuvo la mayor puntuación fue la reparación, con un 29.55% del total, seguido de cerca por desmantelación, que alcanzó un 26.93%. Estos resultados permiten inferir que, aunque el objetivo principal es la selección de un conjunto de funcionalidades relevantes para ser desarrolladas en un sistema administrativo para la gestión de RAEE.

Gráfico 1

Importancia de los criterios primarios en la gestión de servicios de RAEE

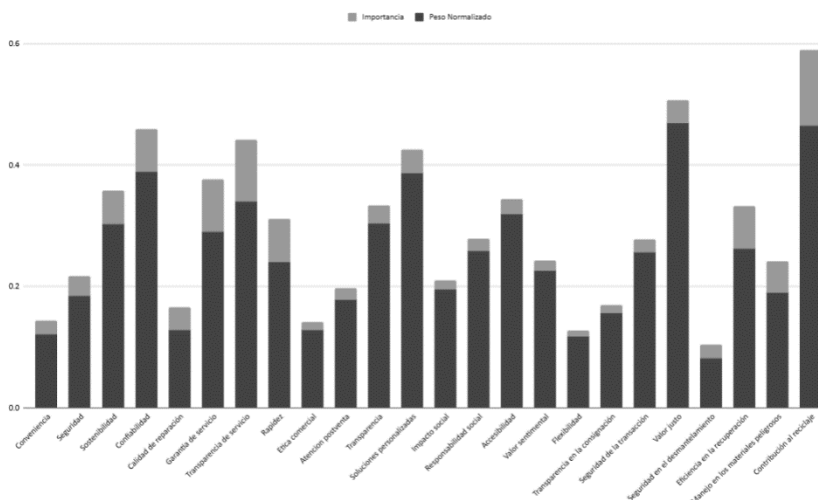


La importancia de las funciones de reparación y desmantelado se basa en el hecho de que la segregación y recuperación de componentes en dispositivos aún funcionales o con potencial valor económico, es una parte fundamental del proceso de reutilización dentro del proceso. En otras palabras, la reparación y el desmantelado no solo son cruciales para prolongar la vida útil de los dispositivos, también son esenciales para maximizar el valor económico recuperable de los aparatos. Este servicio es, por tanto, mucho más valorado que la donación directa o la comercialización de piezas o materiales, ya que las actividades de reparación y desmantelado aseguran que los dispositivos puedan ser reutilizados o reciclados de manera más efectiva.

En el segundo nivel de la jerarquía, se observa que algunos factores destacan notablemente, representando el 55% del total de la muestra. Entre los 7 subcriterios más importantes se encuentran: Contribución al Reciclaje, Sostenibilidad, Precio Justo, Eficiencia en la Recuperación de Valor, Confiabilidad, y Transparencia (gráfico 2).

Gráfico 2

Importancia de los criterios secundarios en la gestión de servicios RAEE



Estos resultados reflejan nuevamente la importancia que los expertos otorgan a las actividades centrales del servicio, seguidas por los aspectos financieros. En este contexto, los expertos parecen priorizar aquellos subcriterios que aseguran un enfoque sostenible y justo en el manejo de RAEE, lo cual es coherente con la necesidad de implementar un sistema que no solo sea eficiente desde el punto de vista económico, sino también responsable desde una perspectiva ambiental y social.

CONCLUSIÓN

La metodología aplicada, a través del uso del Proceso Analítico de Jerarquización (AHP), ha proporcionado un marco robusto para la priorización de funciones dentro del sistema administrativo destinado a la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Este enfoque no solo permite una evaluación precisa y objetiva de los criterios relevantes, sino que también destaca la importancia de integrar tanto los aspectos técnicos como los de sostenibilidad en el diseño del sistema. Al jerarquizar los servicios esenciales, como la reparación y el desmantelamiento de los dispositivos, se ha evidenciado la necesidad de tomar decisiones estratégicas que maximicen la eficiencia operativa y económica, mientras se promueve el respeto por el medio ambiente.

La inclusión de criterios como la contribución al reciclaje, la sostenibilidad, la transparencia y la fiabilidad en los subcriterios evaluados refuerza la idea de que, en un sistema de gestión de RAEE, no solo las cuestiones operativas deben ser priorizadas, sino también los principios éticos y ambientales. Este enfoque integral asegura que el sistema no solo sea rentable y eficiente, sino que también apoye la economía circular y las buenas prácticas en términos de manejo de residuos electrónicos.

Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para el desarrollo futuro del sistema, ofreciendo directrices claras para la implementación de un Producto Mínimo Viable (MVP) que no solo cumpla con los requisitos del sector, sino que también se alinee con los objetivos globales de sostenibilidad y responsabilidad social. Estos hallazgos serán clave en la etapa de diseño y en las decisiones que guiarán la evolución del sistema, asegurando que se logren los objetivos estratégicos de la gestión de RAEE de manera efectiva, equilibrada y alineada con las necesidades del entorno global.

REFERENCIAS

Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khatriwal, D. S., & Luda di Cortemiglia, V. (2024). Global E-waste Monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf


Corona, M., & Cortes, G. (2024). Diseño de un Sistema de Producción de Servicios orientado a la recuperación, selección y tratamiento de RAEE en Orizaba, Veracruz. Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

Lercher, A., Glock, J., Macho, C., & Pinzger, M. (2024). Microservice API Evolution in Practice: A Study on Strategies and Challenges. *Journal of Systems and Software*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112110>

Nantes, E. A. (2019). El método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones: repaso de la metodología y aplicaciones.

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

Vargas, L., & Thomas, S. (2022). *The Analytic Hierarchy Process* (H. Frederick & P. Camille C., Eds.; Second Edition, Vol. 175). Springer. <http://www.springer.com/series/6161>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) .

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto de una investigación financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (849649). De la misma manera se agradece a todos los que participaron durante las revisiones por sus comentarios constructivos y sugerencias para mejorar este artículo.