



Circular Economy in the Reuse of Electronic Components Recovered from Printed Circuit Board Waste: A Systematic Literature Review

Economía circular en la reutilización de componentes electrónicos de placas de circuito impreso de desecho: una revisión sistemática de la literatura

Aníbal Caetano Paulo Nunes¹  

¹ Universidad Europea del Atlántico. Lubango, Angola.

Recibido: 06-07-2026 | Revisado: 12-07-2026 | Aceptado: 24-09-2026 | Publicado: 28-09-2026

Autor de correspondencia: Aníbal Caetano Paulo Nunes 

ABSTRACT

Introduction: The growing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE) and the potential value of printed circuit boards (PCBs) reinforce the need for recovery strategies aligned with the circular economy. **Methodology:** A Systematic Literature Review was conducted according to PRISMA 2020. The search was performed in Google Scholar between 1 and 8 August 2026, considering publications from 2012 to 2025 in Portuguese, Spanish, and English. Fifty records were identified and, after screening, eligibility assessment, and relevance analysis, 25 studies were included and qualitatively synthesized. **Results:** Thematic analysis showed a predominance of studies on circular economy, urban mining, and the transition to circular models (32%), followed by reverse logistics and WEEE management (20%), PCB material recycling and recovery (16%), and reuse, remanufacturing, and recovery (16%). The remaining studies addressed environmental impacts, management and operational support (12%) and public policy/PNRS (4%). **Conclusions:** The reviewed literature confirms the potential of WEEE and PCBs as secondary sources of materials and components. The main gap identified was the limited integration of disassembly, characterization, functional testing, classification, and direct component reuse. The development and validation of standardized procedures is therefore recommended.

Keywords: Circular economy; Electronic waste; Printed circuit boards; Component reuse; Reverse logistics.

RESUMEN

Introducción: El crecimiento de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE) y el valor potencial de las placas de circuito impreso (PCB) refuerzan la necesidad de estrategias de recuperación alineadas con la economía circular. **Metodología:** Se realizó una revisión sistemática de la literatura según PRISMA 2020. La búsqueda se realizó en Google Scholar entre el 1 y el 8 de agosto de 2026, considerando publicaciones entre 2012 y 2025, en portugués, español e inglés. Se identificaron 50 registros y, tras el cribado, evaluación de elegibilidad y análisis de relevancia, se incluyeron y sintetizaron cualitativamente 25 estudios. **Resultados:** El análisis temático mostró una predominancia de estudios sobre economía circular, minería urbana y transición a modelos circulares (32%), seguidos de logística inversa y gestión de WEEE (20%), reciclaje y recuperación de materiales PCB (16%) y reutilización, remanufactura y reutilización (16%). Los estudios restantes correspondieron a impactos medioambientales, apoyo a la gestión y operativo (12%) y a políticas públicas/PNRS (4%). **Conclusiones:** La literatura analizada confirma el potencial de los WEEE y los PCBs como fuentes secundarias de materiales y componentes. La principal brecha identificada fue la integración limitada entre desmontaje, caracterización, pruebas funcionales, clasificación y reutilización directa de componentes. Se recomienda el desarrollo y validación de procedimientos estandarizados para apoyar esta jerarquía de valoración.

Palabras clave: Economía circular; Residuos eléctricos y electrónicos; Placas de circuito impreso; Reutilización de componentes; Logística inversa.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la producción y el consumo de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) ha contribuido al aumento de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE), intensificando los desafíos ambientales, económicos y sociales asociados a su gestión. Las placas de circuito impreso (PCB) son especialmente importantes porque concentran componentes y materiales de valor económico y tecnológico, incluidas fracciones metálicas susceptibles de recuperación [1,2].

La gestión de las PCB se ha orientado con frecuencia a la recuperación de materiales y metales; sin embargo, la literatura también señala oportunidades de reutilización, remanufactura y recuperación de componentes antes del reciclaje [3,4,5]. La identificación de componentes que aún conservan funcionalidad puede preservar el valor incorporado, prolongar los ciclos de vida y reducir la necesidad de materias primas vírgenes.

En este contexto, la economía circular busca sustituir la lógica lineal de extraer, producir, consumir y desechar por estrategias que mantengan los productos, componentes y materiales en circulación durante el mayor tiempo posible. La reutilización, la remanufactura, el reciclaje y la minería urbana son mecanismos complementarios para la valorización de los WEEE [6,7,8]. La logística inversa, a su vez, proporciona las condiciones de apoyo para la recolección, clasificación y reintegración de los materiales en las cadenas productivas [9,10].

La diversidad de técnicas y perspectivas encontradas en la literatura dificulta la identificación de una secuencia integrada que priorice la reutilización de componentes funcionales antes del reciclaje de materiales. Esta cuestión justifica una revisión sistemática capaz de organizar la evidencia sobre recuperación, caracterización, clasificación funcional, reutilización y valorización de residuos de PCB.

En este contexto, el objetivo general de este estudio fue analizar la literatura científica y técnica sobre la valorización y reutilización de componentes procedentes de residuos de placas de circuito impreso, identificando enfoques de recuperación, caracterización, clasificación funcional, reutilización, reciclaje y los factores ambientales, económicos, tecnológicos e institucionales asociados a la economía circular. Para garantizar la coherencia con la muestra realmente analizada, el alcance se definió de forma amplia e incluyó estudios científicos y documentos académicos o técnicos relevantes para la cadena de valorización de los WEEE.

Las variables de análisis se organizaron en cinco dimensiones: (i) valorización en el contexto de la economía circular; (ii) recuperación y caracterización de PCB/componentes; (iii) reutilización, reparación y remanufactura; (iv) logística inversa y gestión de WEEE; y (v) impactos, políticas y condiciones de implementación. El estudio se realizó como una Revisión Sistemática de la Literatura siguiendo PRISMA 2020 [11], con una síntesis cualitativa de los estudios seleccionados.

Las variables consideradas en esta investigación son la economía circular como variable explicativa y la reutilización de componentes electrónicos procedentes de residuos de placas de circuito impreso como variable de análisis, complementadas por dimensiones relacionadas con la recuperación, la caracterización, la clasificación funcional, la sostenibilidad y la valorización de residuos electrónicos.

Para alcanzar este objetivo, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura (SLR) siguiendo las recomendaciones del protocolo PRISMA 2020, lo que permitió identificar, seleccionar, evaluar y sintetizar críticamente la evidencia científica disponible sobre el tema, garantizando transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico.

METODOLOGÍA

Enfoque del estudio

La investigación adoptó un enfoque cualitativo y documental y se diseñó como una Revisión Sistemática de la Literatura (SLR). La elección de una síntesis cualitativa respondió a la heterogeneidad de los estudios y documentos identificados, que incluyeron investigaciones experimentales, estudios cualitativos, revisiones, estudios de caso, modelización, análisis documentales y materiales técnicos.

Método

La revisión se realizó de acuerdo con PRISMA 2020, que orientó la identificación, el cribado, la evaluación de elegibilidad, la extracción y la síntesis de la evidencia [11]. El protocolo se utilizó

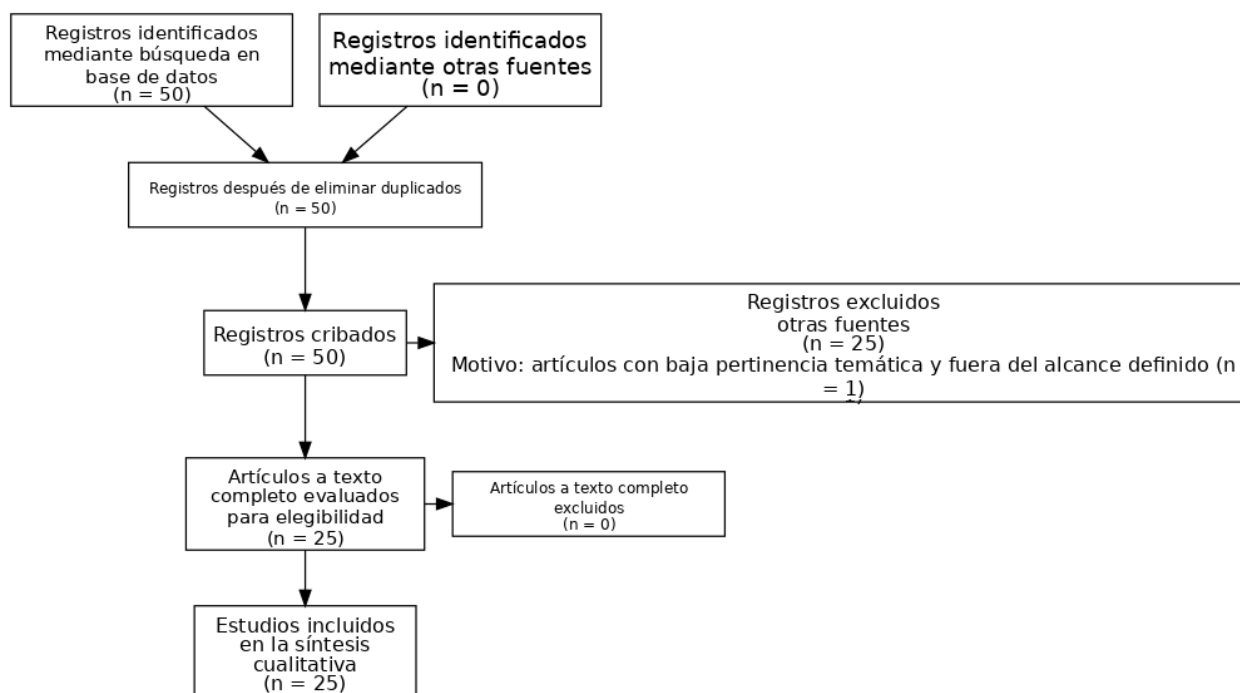
como marco para el informe y la trazabilidad del proceso, sin realizar un metaanálisis.

Fases del estudio

La revisión sistemática se desarrolló en cuatro fases principales.

- Fase 1 - Búsqueda de estudios: se realizó una búsqueda estructurada en Google Scholar entre el 1 y el 8 de agosto de 2026. La ecuación base fue: ("circular economy") AND ("printed circuit board" OR PCB) AND (reuse OR recovery OR "electronic components"). Se consideraron publicaciones en portugués, español e inglés, publicadas entre 2012 y 2025.
- Fase 2 - Cribado y elegibilidad: se identificaron 50 registros. No se eliminaron duplicados, por lo que los 50 registros fueron sometidos al cribado de títulos y resúmenes. En esta etapa, se excluyeron 25 registros por no presentar suficiente pertinencia temática respecto de la pregunta de revisión, incluida la ausencia de una relación explícita con PCB/WEEE, la reutilización o recuperación de componentes y la economía circular, de acuerdo con los criterios de inclusión. Los 25 registros restantes se evaluaron a texto completo y ninguno fue excluido en esa etapa. Así, se incluyeron 25 estudios/documentos en la síntesis cualitativa.
- Fase 3 - Extracción y evaluación: para cada estudio se extrajeron autor/año, tipo de estudio, tema principal, hallazgo relevante y contribución a la economía circular. La calidad metodológica se evaluó mediante una matriz estructurada con cinco criterios: claridad del objetivo, adecuación del diseño/metodología, transparencia de la descripción, coherencia entre resultados y conclusiones y relevancia para la pregunta de revisión. La evaluación se utilizó para interpretar la solidez de la evidencia y no como criterio aislado de exclusión.
- Fase 4 - Síntesis de la evidencia: los resultados se agruparon en categorías temáticas y se compararon en términos de tendencias, contribuciones, limitaciones y brechas. El análisis permitió construir la secuencia conceptual de valorización: PCB descartada -> desmontaje -> caracterización -> prueba funcional -> clasificación -> reutilización de componentes funcionales -> reciclaje de componentes no reutilizables.

Figura 1. Diagrama PRISMA del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios



Nota. Proceso de cribado y selección de los estudios según PRISMA 2020. Elaboración propia.

El diagrama PRISMA presenta 50 registros identificados en Google Scholar y ningún registro procedente de otras fuentes. No se eliminaron duplicados, por lo que se mantuvieron 50 registros para el cribado. Durante el análisis de títulos y resúmenes, se excluyeron 25 registros por baja pertinencia temática respecto de la pregunta de revisión y los criterios de inclusión. Los 25 registros restantes a texto completo fueron evaluados para determinar su elegibilidad, sin exclusiones en esa etapa. Así, se incluyeron 25 estudios/documentos en la síntesis cualitativa.

Inicialmente se identificaron 50 artículos en la base de datos consultada, que posteriormente fueron sometidos a un proceso de cribado y evaluación de relevancia.

Tras el proceso de cribado y evaluación, se seleccionaron 25 artículos, correspondientes al 50% de los artículos analizados inicialmente. Estos estudios constituyen la base documental de la revisión y abarcan diferentes enfoques, incluidos estudios experimentales, estudios de caso, revisiones de literatura, estudios cualitativos, estudios tecnoeconómicos, modelización y análisis documental.

La búsqueda se realizó exclusivamente en Google Scholar, seleccionado por su amplia cobertura y capacidad para recuperar literatura interdisciplinaria sobre WEEE, PCB, economía circular y gestión de residuos. Esta elección constituye una limitación metodológica y fue reconocida explícitamente. El período de publicación de los estudios incluidos fue 2012-2025; la búsqueda final se realizó entre el 1 y el 8 de agosto de 2026. Se identificaron 50 registros y se incluyeron 25 estudios/documentos después del cribado.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios y documentos académicos o técnicos que: (i) presentaran una relación explícita con WEEE, PCB, economía circular, recuperación, reutilización, remanufactura, reciclaje o logística inversa; (ii) proporcionaran información suficiente para identificar el objetivo, el enfoque y la contribución; (iii) estuvieran disponibles a texto completo; y (iv) hubieran sido publicados entre 2012 y 2025 en portugués, español o inglés. Para mantener la coherencia con la muestra, la revisión no se restringió a artículos de revistas y pudo incluir actas de congresos, libros/monografías y materiales técnicos cuando fueran directamente relevantes para la cadena de valorización de los WEEE.

Se excluyeron duplicados, documentos sin texto completo, materiales no relacionados con el objetivo de la revisión, publicaciones fuera del período definido y documentos cuya información no permitiera evaluar su contribución a la pregunta de investigación. Las tesis, los libros, las actas de congresos y los materiales técnicos no fueron excluidos automáticamente; cuando resultaron relevantes, se trataron como documentos de apoyo y se distinguieron de los artículos de revistas en la síntesis.

Procedimiento general

Una vez definidas la estrategia de búsqueda y los criterios de elegibilidad, los registros fueron identificados, cribados y evaluados según el flujo PRISMA 2020. La matriz de extracción se utilizó para organizar autor/año, tipo de estudio, tema, resultados y contribución a la economía circular. La síntesis fue exclusivamente cualitativa debido a la heterogeneidad metodológica y a la ausencia de medidas comparables que justificaran un metaanálisis.

RESULTADOS

La revisión sistemática analizó 50 registros identificados en Google Scholar e incluyó 25 estudios/documentos en la síntesis final. El período de publicación de los estudios seleccionados fue 2012-2025, mientras que la búsqueda final se realizó entre el 1 y el 8 de agosto de 2026. El análisis fue cualitativo y descriptivo, considerando el tipo de estudio, el tema, los resultados y la contribución a la economía circular.

Los estudios se caracterizaron según el año, el tipo de enfoque, el tema principal, el hallazgo relevante y la contribución a la economía circular. La heterogeneidad de los diseños impidió la agregación estadística de los resultados.

Los resultados se presentan mediante síntesis documental y análisis temático. La evaluación metodológica indicó un mayor nivel de detalle en los estudios experimentales y aplicados, mientras que las revisiones, las actas de congresos y los materiales técnicos mostraron mayor heterogeneidad en la descripción de los procedimientos. Esta diferencia se tuvo en cuenta al interpretar los hallazgos.

Caracterización de los estudios seleccionados

El análisis de los 25 estudios/documentos incluidos permitió identificar distintos enfoques metodológicos y temáticos relacionados con la valorización de placas de circuito impreso y la gestión de residuos de equipos eléctricos y electrónicos. Los estudios seleccionados representan diferentes tipos de investigación, desde estudios experimentales centrados en la caracterización,

separación y recuperación de materiales presentes en las placas hasta revisiones de literatura y estudios aplicados relacionados con reciclaje, logística inversa, reutilización, remanufactura y economía circular.

Entre los trabajos analizados, destacan los estudios específicamente orientados a la caracterización y separación física de placas de circuito impreso, la recuperación de la fracción metálica y el desarrollo de procesos de reciclaje y caracterización química de PCB [12,13].

También se identificaron estudios que abordan la logística inversa como estrategia para la gestión de WEEE. La literatura revisada muestra que este enfoque se relaciona con la reducción de los impactos ambientales causados por la disposición inadecuada y con la posibilidad de recuperar valor a partir de los materiales recuperados [14,15].

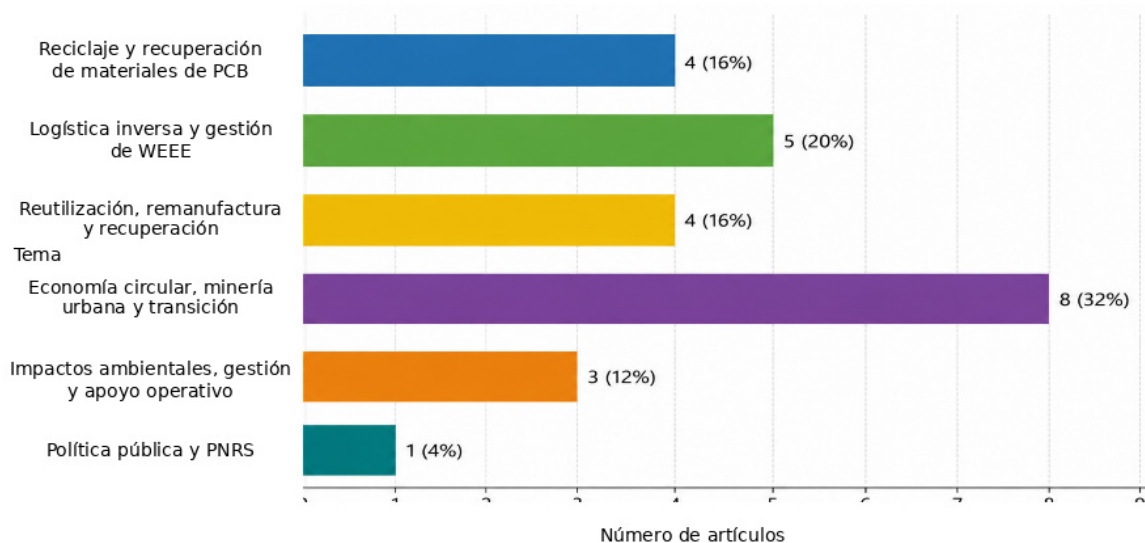
En general, los 25 estudios/documentos seleccionados muestran que la valorización de residuos electrónicos puede abordarse desde diferentes perspectivas que involucran aspectos técnicos, ambientales, económicos y de gestión. Esta diversidad permitió organizar los estudios según las principales variables definidas en la matriz de análisis.

Análisis temático de los estudios incluidos

El análisis de los 25 estudios/documentos seleccionados permitió identificar seis temas principales relacionados con la valorización de residuos de equipos eléctricos y electrónicos, las placas de circuito impreso (PCB) y la economía circular. Los temas se definieron a partir del foco principal de cada estudio con el fin de identificar los enfoques predominantes en la literatura.

La Figura 2 presenta los seis principales temas identificados en los 25 estudios/documentos incluidos.

Figura 2. Distribución temática de los 25 estudios/documentos incluidos



Nota. Porcentajes calculados sobre los 25 estudios/documentos incluidos. Elaboración propia.

Reciclaje y recuperación de materiales de PCB

El primer tema comprende 4 artículos (16%) centrados en la recuperación y valorización de los materiales presentes en las placas de circuito impreso. Los estudios abordan la valorización técnica y económica de las PCB, la caracterización y separación física, la recuperación de la fracción metálica y el desarrollo de procesos de reciclaje y caracterización química.

Esta tendencia muestra que la recuperación de materiales es una de las principales vías identificadas en la literatura para transformar las PCB descartadas en recursos. Los estudios de revisión también muestran que las placas contienen materiales orgánicos, metálicos y cerámicos, y que la heterogeneidad de sus constituyentes representa uno de los desafíos para el reciclaje.

Así, el reciclaje deja de ser únicamente una estrategia de eliminación de residuos y pasa a constituir una oportunidad para recuperar valor económico, especialmente mediante la recuperación de metales y materiales reutilizables.

Tabla 1. Síntesis de los 25 estudios/documentos seleccionados

Autor/Año	Tipo de estudio	Tema principal	Principales resultados
Sakurai (2012)	Investigación científica	Modelo tecnoeconómico para la valorización de PCB	Alternativas técnicas y económicas para la valorización de PCB
Medeiros (2015)	Investigación bibliográfica	Caracterización y separación física de PCB de computadores obsoletos	Caracterización de las placas y técnicas de separación granulométrica y magnética.
Medeiros et al. (2015)	Investigación exploratoria cualitativa	Recuperación de la fracción metálica de placas de circuito impreso	Recuperación de la fracción metálica presente en las placas de circuito impreso.
Priya & Hait (2018)	Investigación experimental	Caracterización y valorización de PCB de equipos al final de su vida útil	Caracterización fisicoquímica de PCB, identificando metales, metales preciosos y tierras raras con potencial de recuperación.
Bayão & Amorim (2018)	Bayão & Amorim (2018)	Bayão & Amorim (2018)	Bayão & Amorim (2018)
de Brida (2019)	de Brida (2019)	de Brida (2019)	de Brida (2019)
Lima & de Lima Maciel (2018)	Lima & de Lima Maciel (2018)	Lima & de Lima Maciel (2018)	Lima & de Lima Maciel (2018)
Porto et al. (2018)	Porto et al. (2018)	Porto et al. (2018)	Porto et al. (2018)
Mandarino & de Sinay (2018)	Revisión de literatura	Impactos y desafíos en la gestión de residuos electrónicos	Identifica desafíos ambientales y de gestión asociados a los residuos electrónicos.
Cintra & Cidade (2020)	Revisión y aplicación práctica	Reutilización y reciclaje: desarrollo de joyería con componentes procedentes de residuos electrónicos	Estudio de teléfonos móviles y evaluación de componentes para su uso en joyería, destacando posibilidades de reutilización.
Simonetto et al. (2016)	Modelización por dinámica de sistemas	Modelo de dinámica de sistemas para evaluar la valorización de residuos de PCB en la remanufactura de computadores	Impactos ambientales y financieros de prolongar la vida útil de los computadores mediante reutilización y remanufactura.
de Brito et al. (2019)	Estudio aplicado	Remanufactura inversa de equipos eléctricos y electrónicos y economía circular	Cadena de remanufactura inversa de equipos y residuos electrónicos en el reciclaje.
Brejão et al. (2020)	Investigación aplicada	Propuesta para la economía circular: reutilización de residuos de microelectrónica	Reutilización de los residuos generados por la microelectrónica.
Franz & Silva (2022)	Revisión	WEEE, ambiente y economía circular	Analiza los WEEE como desafío para las cadenas productivas y el ambiente urbano.
de Sousa Martins et al. (2023)	Revisión integrativa y análisis documental	Transición de la economía lineal a la economía circular de equipos eléctricos y electrónicos	Paso del modelo "extraer-producir-desechar" hacia modelos circulares para equipos eléctricos y electrónicos.
Xavier & Ottoni (2019)	Estudio de revisión técnico-conceptual	Economía circular y minería urbana: residuos de equipos eléctricos y electrónicos	Economía circular y minería urbana, con reinserción de materias primas secundarias en los procesos productivos.
Contador et al. (2022)	Revisión bibliográfica	Paradojas de la logística inversa de WEEE y la minería urbana en Brasil	Paradojas relacionadas con la logística inversa y la minería urbana, con recuperación de materiales.
Gazzola et al. (2025)	Estudio aplicado	Innovación y economía circular de equipos electrónicos	Analiza iniciativas de innovación relacionadas con la circularidad de los equipos electrónicos.
Souza et al. (2025a)	Estudio de caso	Economía circular y obsolescencia programada	La obsolescencia reduce la vida útil de los productos y aumenta la generación de WEEE, en contradicción con los principios circulares.
Sampaio et al. (2024)	Bibliometría	Economía circular y residuos: análisis bibliométrico de la producción científica mundial	Producción científica mundial sobre economía circular y residuos, identificando tendencias y la evolución del campo.
Souza et al. (2025b)	Investigación cualitativa	Desafíos de la transición hacia la economía circular en el sector WEEE de Brasil	Identificación de cinco grupos de cuellos de botella: logística, regulación, consumidores, mercados y diseño.
de Oliveira et al. (2017)	Revisión	Residuos electrónicos: generación, impactos ambientales y gestión	Riesgos asociados a los metales y sustancias tóxicas y a procesos inadecuados de disposición y reciclaje.
Giese et al. (2021)	Estudio con enfoque social	Cooperativas y gestión de WEEE	Papel de las cooperativas en la recolección, gestión y recuperación de residuos electrónicos.
de Oliveira et al. (2023)	Material técnico y educativo	Manual educativo sobre desmontaje y disposición de equipos electrónicos	Procedimientos para el desmontaje y la disposición de dispositivos electrónicos como apoyo metodológico.
Cosenza et al. (2020)	Estudio cualitativo y documental	Economía circular como alternativa para el crecimiento sostenible en Brasil: análisis de la PNRS	Economía circular como alternativa para el crecimiento sostenible en el marco de la Política Nacional de Residuos Sólidos de Brasil.

Nota. Síntesis de los 25 estudios/documentos incluidos, organizada a partir de la matriz de análisis. Elaboración propia.

Logística inversa y gestión de WEEE

El segundo tema comprende 5 artículos (20%). Los estudios analizan la logística inversa, la gestión de la disposición de WEEE y las responsabilidades de los diferentes actores involucrados en el ciclo de vida de los equipos.

La logística inversa aparece como un mecanismo fundamental para permitir que los equipos y sus componentes regresen a las cadenas productivas. La literatura revisada también vincula esta práctica con la reducción de los impactos ambientales y con posibles reducciones de costos.

Esta categoría es especialmente importante para la economía circular porque establece el vínculo entre consumo, posconsumo, recolección, clasificación, recuperación y reintegración de materiales.

Reutilización, remanufactura y recuperación

Se identificaron cuatro artículos (16%) directamente relacionados con la reutilización, la remanufactura y la recuperación de componentes [16,17].

Los estudios muestran un cambio importante de perspectiva: un equipo o componente que ha llegado al final de su uso original puede conservar todavía valor funcional. En lugar de enviarse inmediatamente al reciclaje, puede reutilizarse, recuperarse o remanufacturarse.

Este enfoque se alinea más directamente con los principios de la economía circular porque busca prolongar la vida útil de los productos y componentes antes de su transformación en materias primas secundarias.

Economía circular, minería urbana y transición

Este fue el tema predominante, con 8 de los 25 artículos (32%).

Los estudios de esta categoría abordan directamente la economía circular aplicada a los equipos eléctricos y electrónicos, la minería urbana, la transición de modelos lineales a circulares, la innovación, la obsolescencia programada y los desafíos de la circularidad en el sector [18,19,20,21,22].

La literatura muestra una clara convergencia: el modelo tradicional de extraer-producir-consumir-desechar debe ser sustituido por sistemas capaces de mantener los productos, componentes y materiales en circulación durante períodos más prolongados.

En este contexto, los WEEE son especialmente relevantes porque contienen materiales de valor económico. El estudio sobre obsolescencia programada, por ejemplo, vincula la prolongación de la vida útil, la reparabilidad, la reutilización, la remanufactura y el reciclaje con los principios de la economía circular.

La minería urbana también surge como una estrategia de valorización de residuos, transformando los materiales contenidos en equipos descartados en una especie de “reserva secundaria” de recursos.

Impactos ambientales, gestión y apoyo operativo

Los artículos 22 a 24 corresponden a 3 estudios (12%) y presentan un enfoque complementario que involucra impactos ambientales, gestión de WEEE, cooperativas y aspectos operativos relacionados con el desmontaje y la recuperación [23,24,25,26].

Los estudios muestran que el problema de los residuos electrónicos no es exclusivamente tecnológico. La disposición inadecuada puede causar impactos ambientales y sociales, mientras que la recolección, clasificación y desmontaje adecuados son necesarios para que los materiales puedan recuperarse.

En el caso de las PCB, la literatura destaca la necesidad de separar los materiales reutilizables de los materiales potencialmente tóxicos, reforzando la importancia de la clasificación y el desmontaje seguro.

Política pública y PNRS

El último tema está representado por el estudio de Cosenza, Andrade y Assunção [8], correspondiente a 1 artículo (4%) de la muestra.

Aunque se trata de un solo estudio entre los 25 seleccionados, posee importancia estratégica porque establece la relación entre economía circular, gestión de residuos, responsabilidad compartida y logística inversa.

El estudio muestra que la Política Nacional de Residuos Sólidos de Brasil (PNRS) constituye un mecanismo importante para aproximar la gestión de residuos a los principios de la economía circular, aunque persisten barreras para su implementación efectiva.

Síntesis del análisis temático

El análisis de los 25 artículos muestra que la literatura no se concentra en una única solución. Existe una cadena de valorización de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos, que puede representarse de la siguiente manera:

Disposición, recolección, clasificación, reutilización, reparación y remanufactura, recuperación de componentes, reciclaje, recuperación de materiales, reintegración productiva, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Cadena de valorización de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos



Nota. Cadena de valorización de WEEE resumida a partir de los 25 estudios/documentos seleccionados. Elaboración propia.

El predominio de estudios sobre economía circular, minería urbana y transición (32%), seguido por logística inversa y gestión de WEEE (20%) y por reciclaje/recuperación y reutilización/remanufactura (16% cada uno), muestra que la literatura ha evolucionado desde una perspectiva centrada exclusivamente en la disposición hacia un enfoque orientado a la recuperación de valor y al mantenimiento de los recursos en circulación.

Al mismo tiempo, la revisión revela una brecha importante: a pesar de la existencia de estudios sobre reciclaje, logística inversa, economía circular y recuperación de materiales, existe espacio para enfoques que integren recuperación, caracterización, evaluación funcional y reutilización directa de componentes electrónicos procedentes de PCB descartadas.

DISCUSIÓN

Predominio de la economía circular y la minería urbana

El análisis de los 25 estudios/documentos mostró que la economía circular, la minería urbana y la transición hacia modelos circulares constituyeron el grupo temático más representativo, con un 32%. Este resultado es coherente con la literatura que interpreta los WEEE como fuentes secundarias de materiales y recursos, acercando la gestión de residuos a las estrategias de circularidad [1,6,18]. El predominio de este grupo indica un cambio de enfoque: los residuos dejan de considerarse únicamente un problema de disposición y pasan a verse también como una reserva potencial de valor.

Los estudios muestran que la minería urbana puede complementar la extracción convencional mediante la recuperación de materias primas secundarias. Sin embargo, los costos y la complejidad de la logística inversa pueden limitar la efectividad de estas estrategias, lo que refuerza la necesidad de integrar recuperación tecnológica, viabilidad económica y organización de la cadena [18].

Por lo tanto, la discusión científica sobre WEEE supera progresivamente la lógica de recolección y disposición e incorpora recuperación de valor, reutilización, remanufactura y reciclaje [5,16,7].

Reciclaje y recuperación de materiales de PCB

Los estudios sobre reciclaje y recuperación de materiales de PCB representaron el 16%. Estos muestran que las placas contienen fracciones materiales susceptibles de caracterización, separación y valorización. Priya y Hait [2] demostraron la importancia de caracterizar PCB procedentes de equipos al final de su vida útil, mientras que Medeiros et al. [3] abordaron la recuperación de la fracción metálica. Estos resultados respaldan la necesidad de caracterizar la placa antes de decidir entre reutilización, recuperación de componentes o reciclaje.

La caracterización y la separación funcionan como etapas de decisión, permitiendo distinguir materiales y componentes con diferentes destinos. Para el presente estudio, esta evidencia sustenta una jerarquía en la que los componentes potencialmente funcionales deben evaluarse antes de enviar la placa a procesos de reciclaje.

En este sentido, los resultados respaldan la adopción de procedimientos sistemáticos de desmontaje, identificación y prueba funcional. La literatura sobre reutilización y remanufactura refuerza que prolongar la vida útil de los componentes puede representar una estrategia de valorización previa a su transformación en materia prima secundaria [4,5].

Reutilización, remanufactura y recuperación

La reutilización, la remanufactura y la recuperación representaron el 16% de la muestra. Estos estudios se alinean directamente con el objetivo de la revisión porque muestran que los productos y componentes al final de su uso pueden conservar valor funcional y destinarse a nuevas aplicaciones [4,17,5].

El modelo de dinámica de sistemas de Simonetto et al. [5] mostró la relevancia de evaluar la prolongación de la vida útil de los computadores mediante reutilización y remanufactura. Aunque no es específico de una única familia de componentes de PCB, el estudio respalda la lógica de extensión del ciclo de vida adoptada en esta revisión.

Sin embargo, los estudios sobre reutilización y reciclaje muestran que la diversidad de equipos y materiales dificulta la estandarización de los procesos [4,17]. Por lo tanto, la evaluación funcional constituye una etapa crítica para evitar que componentes todavía útiles sean enviados prematuramente al reciclaje.

Estos resultados son importantes porque muestran que reutilizar un componente funcional puede representar una alternativa de valorización antes del reciclaje. Por ello, la evaluación funcional de los componentes se convierte en una etapa importante de una estrategia de economía circular.

Logística inversa y gestión de WEEE

La logística inversa y la gestión de WEEE representaron el 20% de los estudios. La literatura muestra que la circularidad depende de mecanismos capaces de recolectar, transportar, clasificar y dirigir productos y componentes hacia la recuperación, la reutilización o el reciclaje [9,15,10].

La logística inversa establece el vínculo entre el posconsumo y los procesos de valorización. En el contexto de las PCB, esto significa que un sistema de reutilización no puede analizarse únicamente en el banco de trabajo: debe considerar el origen de los residuos, la recolección, la clasificación, el desmontaje, la caracterización, las pruebas y el destino final.

Este hallazgo es especialmente importante para un enfoque integrado porque la disponibilidad de componentes para reutilización depende tanto de la condición técnica de la placa como de la existencia de una cadena organizada de recuperación.

Impactos ambientales y necesidad de una gestión adecuada

Los estudios sobre impactos ambientales, gestión y apoyo operativo representaron el 12%. Destacan riesgos asociados a la disposición inadecuada, la presencia de sustancias potencialmente peligrosas y la manipulación sin procedimientos de seguridad [24,23].

Una gestión adecuada requiere recolección, clasificación y desmontaje seguro, así como una

derivación compatible con las características de los materiales. El material técnico de Oliveira et al. [26] refuerza la importancia de los procedimientos de desmontaje y de una disposición responsable.

Así, la recuperación de componentes funcionales antes del reciclaje no constituye únicamente una estrategia económica, sino también una medida para prevenir impactos y recuperar valor de los residuos.

Barreras para la implementación de la economía circular en los WEEE

A pesar de sus beneficios, la implementación de la economía circular en los WEEE enfrenta barreras relacionadas con la logística, la regulación, el comportamiento del consumidor, los mercados y el diseño de los productos. Souza et al. [22] identificaron estos cinco grupos de cuellos de botella, mostrando que la disponibilidad de tecnologías de recuperación por sí sola no garantiza la circularidad.

Figura 4. Barreras para la implementación de la economía circular en los WEEE



Nota. Barreras para la economía circular de los WEEE. Elaboración propia.

En consecuencia, se requieren condiciones institucionales, económicas y técnicas que garanticen una segunda utilización de los componentes recuperados. La circularidad exige articulación entre tecnología, mercados, regulación y comportamiento de los actores involucrados.

Síntesis crítica y brecha identificada

En general, los 25 estudios/documentos analizados proporcionan evidencia convergente sobre reciclaje, logística inversa, reutilización, remanufactura, minería urbana y economía circular [1,5,7]. Sin embargo, la mayor parte de la literatura aborda los WEEE de forma amplia, y son menos frecuentes los estudios que integran, en una única secuencia, desmontaje, caracterización, prueba funcional, clasificación y reutilización directa de componentes de PCB.

La principal brecha identificada fue, por lo tanto, la ausencia de procedimientos integrados y suficientemente estandarizados para decidir, con base en evidencia funcional, qué componentes deben reutilizarse y cuáles deben pasar al reciclaje. Esta brecha sustenta la propuesta conceptual presentada en este estudio.

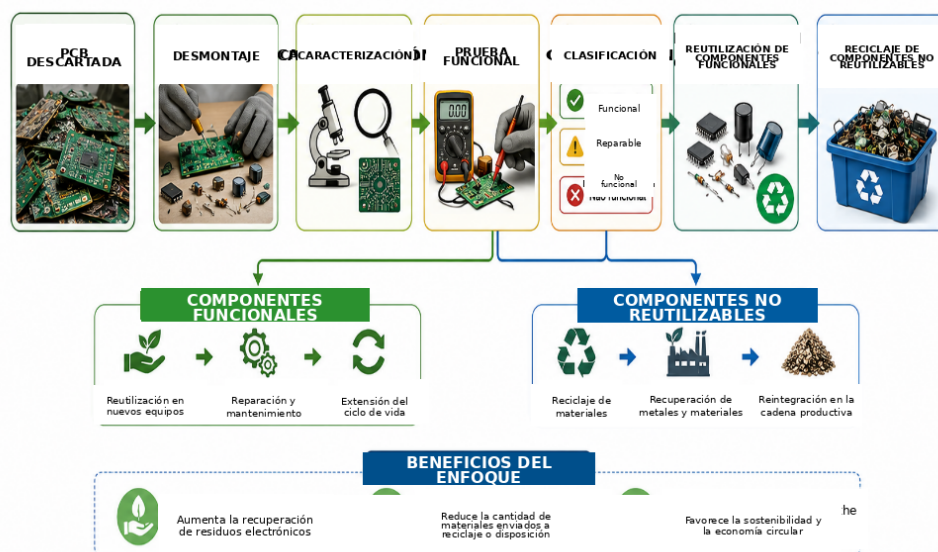
La propuesta no sustituye el reciclaje; busca establecer una prioridad de valorización en la que la reutilización funcional sea evaluada antes que la recuperación de materiales, preservando una mayor proporción del valor incorporado en el componente.

En consecuencia, la propuesta de este estudio se organiza según la secuencia: PCB descartada -> desmontaje -> caracterización -> prueba funcional -> clasificación -> reutilización de componentes funcionales -> reciclaje de componentes no reutilizables.

PCB descartada, desmontaje, caracterización, prueba funcional, clasificación, reutilización de componentes funcionales y reciclaje de componentes no reutilizables.

Esta secuencia constituye una propuesta conceptual derivada de la síntesis temática de la revisión y deberá validarse experimentalmente en estudios futuros antes de ser tratada como un procedimiento operativo estandarizado.

Figura 5. Propuesta integrada para la valorización de componentes de PCB en el contexto de la economía circular



Nota. Secuencia de tratamiento de placas de circuito impreso (PCB). Elaboración propia.

Limitaciones

Esta revisión presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. La búsqueda se realizó exclusivamente en Google Scholar, lo que pudo haber reducido la cobertura de bases de datos especializadas. La muestra también mostró heterogeneidad metodológica e incluyó, además de artículos de revistas, actas de congresos, libros/monografías y materiales técnicos relevantes, lo que limita las comparaciones cuantitativas. El período documental fue 2012-2025 y la revisión no realizó un metaanálisis. Por último, el REC-PCB Framework propuesto no fue validado experimentalmente en esta etapa y debe considerarse una hipótesis de organización del proceso, no un método ya validado.

CONCLUSIÓN

La revisión identificó 50 registros e incluyó 25 estudios/documentos en la síntesis final, con un predominio temático de la economía circular, la minería urbana y la transición hacia modelos circulares (32%), seguido por la logística inversa y la gestión de WEEE (20%).

Los resultados confirman que las PCB y los WEEE pueden valorizarse mediante caracterización, recuperación, reutilización, remanufactura y reciclaje. La reutilización de componentes funcionales antes del reciclaje constituye una estrategia coherente con la economía circular porque busca preservar el valor incorporado y prolongar el ciclo de vida.

Las investigaciones futuras deberían validar experimentalmente procedimientos de desmontaje, caracterización, prueba funcional y clasificación, incluidos indicadores de tasa de recuperación, confiabilidad, costo, consumo energético y beneficios ambientales. También son pertinentes los sistemas automatizados de identificación y clasificación.

La problemática de los WEEE debe ampliarse más allá de la dimensión tecnológica, integrando logística inversa, regulación, mercados, comportamiento del consumidor, diseño, seguridad ocupacional y minería urbana. La consolidación de la economía circular depende de la integración de estas dimensiones.

Prospectivamente, la secuencia PCB descartada -> desmontaje -> caracterización -> prueba funcional -> clasificación -> reutilización -> reciclaje puede constituir una base para sistemas de valorización más eficientes. El REC-PCB Framework propuesto en este estudio presenta potencial como estructura conceptual, pero su eficacia y generalización dependerán de la validación experimental y de la comparación con rutas convencionales de reciclaje.

Referencias

1. Franz NM, Silva CLD. Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE): desafio global e contemporâneo às cadeias produtivas e ao ambiente urbano. *Gestão & Produção*. 2022;29:e6621. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e6621>
2. Priya A, Hait S. Comprehensive characterization of printed circuit boards of various end-of-life electrical and electronic equipment for beneficiation investigation. *Waste Manag*. 2018;75:103-123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.014>
3. Medeiros N, Micussi A, dos Santos DA, de Lucena LF, de Souza CP. Recuperação da fase metálica das placas de circuito impresso. *Chemical Engineering Proceedings*. 2015;1(2):8391-8398. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1233-20354-178031>
4. Cintra LSK, Cidade MK. Reutilização e reciclagem: desenvolvimento de joia com componentes oriundos de resíduos eletroeletrônicos. *Mix Sustentável*. 2020;6(3):27-36. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n3.27-36>
5. Simonetto EO, Putnik G, Rodrigues GO, Alves C, de Castro H. Um modelo de dinâmica de sistemas para avaliação do reaproveitamento de resíduos eletrônicos na remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior. *Exacta*. 2016;14(3):385-402. <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v14n3.6404>
6. Xavier LHDSM, Ottoni MDSO. Economia circular e mineração urbana: resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. CETEM; 2019.
7. de Sousa Martins T, Leitão FO, Guarnieri P. Transição da economia linear para a economia circular de equipamentos eletroeletrônicos. *Revista Organizações em Contexto*. 2023;19(37):329-361.
8. Cosenza JP, de Andrade EM, de Assunção GM. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. 2020;9(1):e16147. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16147>
9. de Brida IC. Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: uma análise do sistema no Brasil. *Tecnologia e Ambiente*. 2019;25:110-133. <https://doi.org/10.18616/ta.v25i0.5409>
10. Porto WS, de Souza JA, Campos KS, de Freitas MAL. Gestão do descarte de resíduos eletroeletrônicos com foco na TI Verde. *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade*. 2018;7(2):47-68. <https://doi.org/10.17800/aos.v7i2.907>
11. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
12. Sakurai MVO. Modelo técnico e econômico de reaproveitamento de placas de circuito impresso [trabalho de conclusão de curso]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2012.
13. Medeiros NM. Caracterização e separação física de placas de circuito impresso de computadores obsoletos [dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2015.
14. Bayão DV, Amorim CMMP. Logística reversa do lixo eletrônico: uma comparação do cenário brasileiro com alguns países desenvolvidos. In: 37º Seminário de Logística – Suprimentos, PCP e Transportes, ABM Week; 2018; São Paulo, Brasil.
15. Lima JRB, de Lima Maciel Filho JAC. Logística reversa e sustentabilidade: um estudo do setor de eletroeletrônicos. *Razão Contábil e Finanças*. 2018;9(1). <https://doi.org/10.71136/rrecef.v9i1.170>
16. de Brito JLR, Ruiz MS, Kniess CT, dos Santos MR. Remanufatura reversa de equipamentos eletroeletrônicos e a economia circular. In: XXI ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente; 2019; São Paulo, Brasil. São Paulo: FEA/USP; 2019. p. 1-16.
17. Brejão AS, Vendrametto O, de Oliveira Morais M. Proposta para a economia circular: reuso do resíduo da microeletrônica. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*. 2020;8(13):142-154. <https://doi.org/10.5380/relainep.v8i13.73185>
18. Contador LS, Freire LS, Xavier LH. Paradoxos da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos e a mineração urbana no Brasil. *Revista Tecnologia e Sociedade*. 2022;18(53):141-151. <https://doi.org/10.3895/rt.v18n53.15790>
19. Gazzola SB, da Silva EB, Brito GFP, da Silva VC. Inovação na economia circular de equipamentos eletrônicos. *Revista Eletrônica e-Fatec*. 2025;15(1):1-14.
20. Souza FR, Fini F, Venanzi D. Economia circular e obsolescência programada: estudo de caso em uma empresa do setor eletroeletrônico. *Refas*. 2025;12(1):1-19. https://doi.org/10.26853/Refas_ISSN-2359-182X_v12n01_06
21. Sampaio IR, de Oliveira AM, de Oliveira LNA. Economia circular e resíduos: uma análise bibliométrica da produção científica mundial. *Concilium*. 2024;24(7):321-342. <https://doi.org/10.53660/CLM-3248-24G28>
22. Souza RSD, Guarnieri P, Vieira BDO. Desafios da transição para a economia circular no setor de resíduos eletroeletrônicos no Brasil. *Revista de Administração de Empresas*. 2025;65(4):e2024-0194. <https://doi.org/10.1590/S0034-759020250401>
23. Mandarino MLF, de Sinay MCF. Os impactos e desafios no gerenciamento do resíduo eletroeletrônico. *Revista Científica Semana Acadêmica*. 2018;1(155).
24. de Oliveira JD, Selva V, de Mendonça Pimentel RM, Machado S. Resíduos eletroeletrônicos: geração, impactos ambientais e gerenciamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 2017;10(5):1655-1667.
25. Giese EC, Xavier LHSM, Ottoni MSO, Araújo RA. Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos. CETEM/MCTI; 2021. ISBN 978-65-5919-005-8.
26. de Oliveira E, Costa LS, Nunes JVS, Dias VM. Manual didático sobre o desmonte e descarte de aparelhos eletrônicos. Congresso Brasileiro de Resíduos Sólidos. 2023. <https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.XIII-013>

Financiación

No se recibió financiamiento específico para esta investigación.

Conflictos de interés

No existen conflictos de intereses que declarar.

Contribución de autoría

Conceptualización: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Curación de datos: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Análisis formal: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Redacción - borrador original: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Redacción - revisión y edición: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Investigación: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Metodología: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Administración del proyecto: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Validación: Aníbal Caetano Paulo Nunes.

Visualización: Aníbal Caetano Paulo Nunes.