

Circularidad por Producto



SUMARIO

DIRECTOR ISDE
IDAE LA O FLO

REDACCIÓN
SARAI ORTA PUGA

DISEÑO Y REALIZACIÓN
ONIEL S. GUTIÉRREZ REYES

WEBMASTER
ISNEY SUSANA HERRERA HERNÁNDEZ
ONIEL S. GUTIÉRREZ REYES

CONTACTOS
Empresa de Ingeniería del Reciclaje
Calle Zapata #1558 e/ Paseo y 2. Vedado.
Plaza de la Revolución. Cuba
observatorio@isde.co.cu
observatorio.reciclaje.cu

03

Circulación por
productos: El cambio
hacia un reciclaje más
inteligente y eficiente

El Rol de la Inteligencia
Artificial en la
clasificación de
productos

09

16

Metodología para la
recuperación de ma-
teriales críticos en
residuos electrónicos

Circulación por Producto: El Camino hacia un Reciclaje más Inteligente y Eficiente



¿Reciclamos realmente o solo clasificamos residuos? En un mundo que genera más de 2.000 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año (Banco Mundial, 2022), la pregunta ya no es solo cómo reciclar más, sino cómo reciclar mejor. ¿Estamos extrayendo el máximo valor de los materiales que descartamos? ¿O los esfuerzos de reciclaje siguen atrapados en sistemas ineficientes y generalistas? En este contexto, el concepto de circulación por producto emerge como una estrategia esencial para transformar el reciclaje en un proceso específico, optimizado y verdaderamente circular. ¿Qué pasaría si diseñáramos cada producto pensando en su futuro reciclaje? ¿Y si cada botella, batería o neumático siguiera un camino específico para su recuperación? Este es el fundamento de la circulación por producto, una estrategia

emergente dentro de la economía circular que apunta a repensar el reciclaje desde la raíz del diseño hasta la recuperación especializada. Este artículo explora el concepto de “circulación por producto” (product-specific recycling), analizando sus fundamentos teóricos, aplicaciones prácticas, retos actuales y su papel clave en la transición hacia una economía circular efectiva.

1. ¿Qué es la Circulación por Producto?

El término circulación por producto (en inglés, product-specific recycling) se refiere a un enfoque de gestión de residuos centrado en el análisis, recuperación y reprocesamiento de productos o materiales específicos, en lugar de tratar los residuos como flujos genéricos. A diferencia de los modelos tradicionales, este enfoque permite diseñar sistemas de reciclaje

altamente adaptados a las propiedades químicas, físicas y logísticas de cada tipo de producto, maximizando la eficiencia y minimizando la pérdida de recursos (Ge- yer et al., 2017).

La circulación por producto prioriza el tratamiento diferenciado de productos o materiales específicos. A diferencia del reciclaje tradicional —que trata los residuos de forma genérica y frecuentemente ter-

do su vida útil y reduciendo residuos.

Este enfoque sistémico de la economía circular busca maximizar la retención de valor y minimizar la pérdida de recursos mediante estrategias adaptadas a las características técnicas, químicas y logísticas de cada producto.

El término está relacionado con cómo los productos y materiales pueden volver a entrar en el ciclo productivo, en lugar de

ser desechados. Es decir, busca cerrar el ciclo para que los materiales no terminen como residuos, sino que circulen continuamente en forma de nuevos productos o materias primas recicladas.

Este concepto busca maximizar la eficiencia de los recursos y minimizar los residuos, promoviendo la sostenibilidad ambiental y económica, incluyendo:

1. Producción: Obtención de materias primas y fabricación del producto.
2. Consumo: Uso del producto por parte del

mina en tasas de reciclaje muy bajas—, este modelo diseña y gestiona flujos únicos, con soluciones tecnológicas y logísticas personalizadas. La circulación por producto alude a la trazabilidad y reincorporación de los productos o sus materiales en el sistema económico, prolongan-

consumidor.

3. Post-consumo: Qué ocurre con el producto una vez que deja de ser útil (recolección, reutilización, reciclaje, valorización o disposición final).

La circulación por producto implica estrategias como la reutilización, la readapta-



ción y el reciclaje, que permiten extender la vida útil de los productos y reducir la necesidad de materias primas vírgenes. Estas estrategias se basan en tres pilares fundamentales: el diseño del producto, los procesos operativos y la aceptación del consumidor. El diseño modular y la incorporación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el Internet de las cosas (IoT), facilitan la trazabilidad y el mantenimiento predictivo, optimizando así la circulación de productos en la economía circular.

2. Los tres pilares de la circulación por producto

La literatura científica identifica tres pilares fundamentales para la implementación eficaz de la circulación por producto:

“
 ...El IoT
 facilita la
 trazabilidad el
 mantenimiento
 predictivo...
 ”

a. Especificidad del Flujo de Materiales

Cada producto tiene una composición y un ciclo de vida único. La circulación por producto reconoce esta especificidad y adapta los sistemas de recolección, clasificación y reciclaje a estas características. Analizar el ciclo de vida de productos concretos—como envases PET, baterías de litio o neumáticos—permite diseñar soluciones adaptadas a sus particularidades. Por ejemplo, los sistemas de depósito y retorno (DRS) para envases de vidrio y aluminio alcanzan altas tasas de reciclaje en países como Alemania, donde la infraestructura está diseñada específicamente para esos productos. En los últimos 20 años, el sistema de reciclaje de envases de Alemania se ha



Una manera eficiente de gestionar tus residuos



Si tienes residuos en casa o en tu centro de trabajo y no sabes que hacer con ellos o no tienes tiempo. Reciklando es la solución. Nos encargamos de tus residuos y te ofrecemos un pago por ello.



<http://reciklando.reciclaje.eu>

<https://apklis.eu/application/com.isde.reciklando>

convertido en el más exitoso del mundo. En 2019, logró una tasa de reciclaje de botellas de PET (tereftalato de polietileno) del 94 % gracias a las obligaciones de recogida para todos los minoristas y a los incentivos suficientemente altos para que los consumidores devuelvan sus envases. Además del DRS, el país también aplica la responsabilidad ampliada del productor para mejorar las tasas de reciclaje. En conjunto, estas políticas ayudaron a Alemania a alcanzar una tasa de reciclaje del 67,9 % para todos los envases en 2021 (BloombergNEF, 2021).

b. Ecodiseño o Diseño para la Circularidad

El reciclaje eficiente comienza desde el diseño del producto. Incorporar criterios de reciclabilidad desde la etapa de diseño es clave. Criterios como modularidad, desmontabilidad y uso de materiales monocomponentes aumentan significativamente la posibilidad de recuperación. Los envases monomateriales (como PET puro) tienen una tasa de reciclabilidad mucho mayor que los envases multicapa, que mezclan polímeros incompatibles y dificultan la separación mecánica (Ragaert et al., 2020).

c. Tecnologías de Recuperación Especializadas

A medida que los productos se vuelven más complejos, también deben hacerlo las tecnologías para su recuperación.

- **Reciclaje enzimático para PET:** Tournier et al. (2020) desarrollaron una enzima capaz de descomponer el PET en sus monómeros originales, con una eficiencia superior al 90%.

- **Hidrometalurgia en RAEE:** La extracción selectiva de metales preciosos como el oro y el paladio de residuos electrónicos se está perfeccionando gracias a técnicas químicas avanzadas (Gulliani et al., 2023).

3. Diferencias Clave con el Reciclaje Tradicional

ENFOQUE	CIRCULACIÓN POR PRODUCTO	RECICLAJE TRADICIONAL
	Tipo de flujo	
CIRCULACIÓN POR PRODUCTO	Específico (ej.: baterías Li-ion)	RECICLAJE TRADICIONAL
Tecnología aplicada	Adaptada (pirólisis, biolixiviación)	Estándar (trituración)
Eficiencia en reciclaje	Alta (hasta 95% en aluminio)	Baja (9% en plásticos mixtos)
Marco normativo	REP (Responsabilidad Extendida del Productor)	Directivas generales

Fuentes: Ellen MacArthur Foundation, 2023; OECD, 2022

4. Aplicaciones prácticas: Casos reales de éxito

a. Envases Plásticos

Según Geyer et al. (2017), solo el 14% de los envases plásticos se reciclan globalmente, en gran parte debido a la mezcla de polímeros y la ausencia de sistemas de separación eficaces. Iniciativas como HolyGrail 2.0, que utiliza marcas digitales, invisibles al ojo humano pero legibles por escáneres inteli-

gentes, para clasificación automatizada permitiendo una clasificación más precisa en las plantas de reciclaje, podrían revertir esta situación (WRAP, 2023).

b. Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)

Los RAEE contienen hasta 50 veces más oro que las minas tradicionales (UNEP, 2021). Sin embargo, su recuperación requiere de procesos que permitan su recuperación eficiente. Técnicas avanzadas como la hidrometalurgia o la biolixiviación, que utiliza microorganismos para disolver metales preciosos.

c. Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

La pirólisis catalítica permite transformar NFU en carbono negro y aceites útiles. La empresa Pyrum Innovations desarrolló un proceso de pirólisis catalítica para descomponer neumáticos en carbono negro, aceite pirolítico y gas reutilizable, reduciendo significativamente los residuos generados por este tipo de material.

5. Desafíos y Críticas

a. Complejidad Técnica

Los productos multicapa, como ciertos envases de alimentos, siguen siendo un obstáculo para el reciclaje eficiente (Ragaert et al., 2020).

b. Costos Económicos

Estudios del instituto Fraunhofer UMSICHT (2023) indican que el reciclaje químico puede ser hasta tres veces más caro que el mecánico, lo que representa una barrera para su escalabilidad industrial.

c. Greenwashing corporativo

Algunas empresas etiquetan como "reciclado" a materiales que se incineran para producir energía, sin garantizar la circula-

ridad real de los materiales (GAIA, 2023).

6. El factor humano: Conciencia y comportamiento del consumidor

Más allá de la ingeniería y la economía, la percepción del consumidor juega un papel fundamental. Un estudio de la Universidad Estatal de Pensilvania demostró que informar a los consumidores sobre los productos derivados del reciclaje. Los investigadores demostraron que cuando los consumidores conocen qué nuevos productos pueden surgir de los residuos (como convertir una botella en una chaqueta), su disposición a reciclar aumenta notablemente, incrementando significativamente las tasas de reciclaje (Winterich et al., 2019).

Además, nuevas investigaciones destacan la importancia del diseño modular y la trazabilidad habilitada por inteligencia artificial e IoT para facilitar la reutilización y el mantenimiento predictivo, lo cual op-

CIRCULACIÓN POR PRODUCTO: EVOLUCIÓN DEL RECICLAJE

La circulación por producto representa una evolución necesaria del reciclaje hacia un modelo de gestión de residuos más inteligente y eficaz.



timiza la circulación de productos (Psarommatis & May, 2025).

Conclusión: Hacia una verdadera circularidad

La circulación por producto representa una evolución necesaria del reciclaje hacia un modelo de gestión de residuos más inteligente, eficaz y adaptable. Este enfoque representa un paso crucial para profesionalizar y sofisticar los sistemas de reciclaje, alineándolos con los principios reales de la economía circular. Si se quiere cerrar el ciclo de vida de los productos de manera efectiva, es imprescindible avanzar en tres frentes:

1. Innovación continua en ecodiseño para asegurar productos fácilmente reciclables.

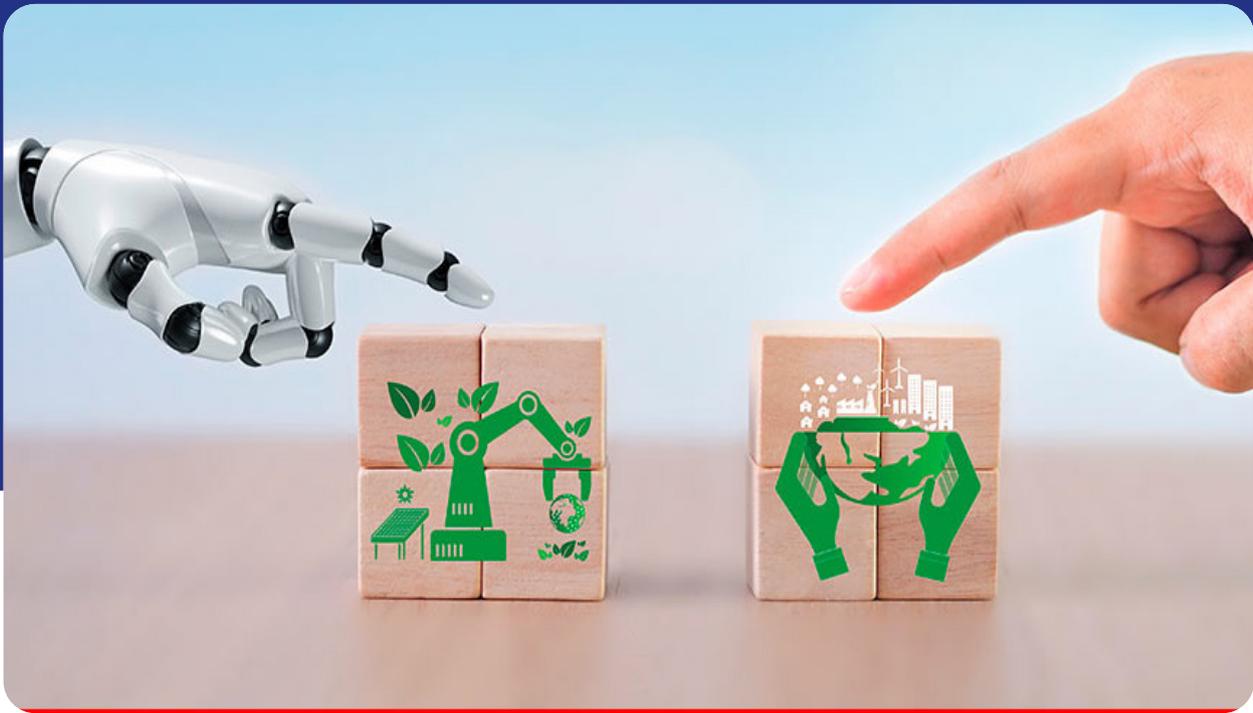
2. Inversión en infraestructuras especializadas que permitan el tratamiento diferenciado por tipo de producto (Inversión en tecnologías específicas y adaptadas).

3. Marcos normativos robustos, como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que obliguen a los fabricantes a cerrar el ciclo de vida de sus productos.

El desafío no es menor, pero las oportunidades —económicas, ambientales y sociales— son sustanciales. La clave está en pasar de un reciclaje genérico y reactivo a uno específico, proactivo y tecnológicamente optimizado. Más allá de una tendencia, este enfoque puede marcar la diferencia entre una economía lineal insostenible y un futuro verdaderamente circular.



El Rol de la Inteligencia Artificial en la Clasificación de Productos



Introducción

¿Puede la inteligencia artificial (IA) transformar radicalmente la gestión de residuos y la economía circular? En un contexto global donde la generación de residuos crece exponencialmente, la correcta clasificación de productos para su reciclaje se vuelve un desafío crítico. La gestión eficiente de residuos es un pilar fundamental para avanzar hacia una economía circular, donde cada producto y material recupere valor mediante su reincorporación en nuevos ciclos productivos. En este escenario, la inteligencia artificial (IA), aplicada a través de machine learning y la robótica en plantas de sorting, se posiciona como una herramienta clave para optimizar la clasificación de productos reciclables. Este artículo profundiza en cómo estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia operacional, sino que también potencian la circularidad por producto, un concepto que busca maximizar la vida útil y reutilización de cada componente.

“...Puede la IA transformar radicalmente la gestión de residuos y la economía circular?...”

”

IA y Economía Circular: Clasificación Inteligente para la Circularidad por Producto

La economía circular por producto implica diseñar y gestionar materiales y productos para que puedan ser recuperados, reciclados o reutilizados con la máxima eficiencia. La IA contribuye decisivamente a este objetivo al facilitar la identificación precisa de materiales en flujos complejos de residuos, permitiendo que cada componente sea clasificado y tratado según sus características específicas.

La visión artificial, combinada con sensores avanzados, permite no solo reconocer tipos básicos de materiales (plásticos, metales, papel), sino también distinguir variantes dentro de estas categorías, como diferentes polímeros o aleaciones metálicas. Esto es fundamental para evitar la contaminación cruzada y asegurar que los materiales reciclados mantengan su calidad para reincorporarse a la cadena productiva. Un ejemplo paradigmático es la plataforma AMP

Robotics, que utiliza IA para identificar y clasificar más de 100 categorías y características diferentes de materiales reciclables en flujos mixtos. Su sistema AMP Neuron™ combina aprendizaje profundo con robótica inteligente (AMP Cortex™), capaz de clasificar hasta 80 artículos por minuto con una precisión del 99%. Esta tecnología ha sido implementada en múltiples plantas, demostrando un aumento significativo en la recuperación de materiales y la pureza del reciclaje.

Aplicación de Machine Learning y Robótica en Plantas de Sorting

La clasificación manual de residuos presenta limitaciones evidentes: lentitud, errores humanos y dificultad para identificar materiales complejos o contaminados. La inteligencia artificial, mediante algoritmos de machine learning, permite automatizar y perfeccionar esta tarea. Equipos robotizados integrados con sensores avanzados analizan cada producto en tiempo real, identificando su composición y dirigiéndolo al flujo adecuado para su reciclaje.

'Machine learning': El maestro en reconocer patrones

La capacidad de aprendizaje y de predicción de las máquinas se ha incrementado a lo largo del tiempo. Esto se observa tanto en los asistentes virtuales, que cada vez son más eficientes al responder y ejecutar tareas gracias a la mejora de los grandes modelos de lenguaje (LLM), como en plataformas de 'streaming' o comercio electrónico, que utilizan algoritmos para personalizar contenidos. El 'machine learning', especializado en el reconocimiento de patrones, es un campo en auge con décadas de historia. Esta rama de la inteligencia artificial, permite que las máquinas aprendan ciertas tareas sin ser programadas de manera específica para ellas. Para ello, utilizan estadísticas para predecir y reconocer patrones, por ello funcionan mejor en grandes conjuntos de datos.

El 'machine learning', o aprendizaje automático en español, es la ciencia de desarrollo de algoritmos y modelos estadísticos que utilizan

los sistemas de computación con el fin de llevar a cabo tareas sin instrucciones explícitas, en vez de basarse en patrones e inferencias. Los sistemas de computación utilizan algoritmos de 'machine learning' para procesar grandes cantidades de datos históricos e identificar patrones de datos. Esto les permite generar resultados con mayor precisión a partir de un conjunto de datos de entrada. Por ejemplo, los científicos de datos pueden entrenar una aplicación médica para diagnosticar el cáncer con imágenes de rayos X a partir del almacenamiento de millones de imágenes escaneadas y diagnósticos correspondientes.

El 'machine learning' es un maestro en el reconocimiento de patrones, así como en realizar predicciones y recomendaciones a partir del procesamiento de grandes volúmenes de datos. Esto permite a los algoritmos mejorar continuamente para mejorar en el desempeño de sus tareas e incluso para afrontar otras para las que no fueron diseñados.

El 'machine learning' permite que las empresas impulsen el crecimiento, generen nuevas fuentes de ingresos y resuelvan problemas complejos. Los datos son la fuerza que impulsa la toma de decisiones empresariales. Estos suelen tener diversos orígenes, como los comentarios de los clientes, los empleados y las finanzas. La investigación dedicada al 'machine learning' automatiza y optimiza este proceso. Las empresas pueden obtener resultados más rápido con programas que analizan grandes volúmenes de datos a gran velocidad.

Sistema de Clasificación (Sorter)

En un mundo donde la eficiencia y la velocidad en los procesos logísticos son fundamentales para el éxito de las empresas, el sistema de sorting se ha convertido en una herramienta esencial. Este sistema, también conocido como sistema de clasificación de productos, permite automatizar y optimizar la distribución de productos en múltiples industrias. A continuación, exploraremos en detalle qué es, para qué sirve y cómo funciona este sistema, así como sus aplicaciones y ventajas.

Un sistema sorting es una solución tecnológica diseñada para clasificar y distribuir productos o mercancías de forma automática. Se basa en la detección, el reconocimiento y la organización de los objetos según criterios preestablecidos, tales como tamaño, forma, peso o destino final. Los sistemas de clasificación de productos están integrados por diversos componentes mecánicos y electrónicos, que trabajan en conjunto para mejorar el rendimiento y la precisión de los procesos de sorteo.

El sistema sorter tiene como propósito principal agilizar la separación y preparación de pedidos dentro de un centro de distribución o almacén. Esta eficacia se traduce en una reducción significativa del tiempo de procesamiento y un incremento en la capacidad de manejo de artículos. Al utilizar un sistema sorting, las empresas pueden asegurar una mayor rapidez en la entrega de productos y una mejor experiencia de servicio al cliente.

Los sorters o clasificadores son un tipo especial de solución que combina transportación, mecanismos de desviación, controles y software, permitiendo así clasificar flujos medios y elevados de productos bajo diferentes criterios a necesidad de los procesos del cliente.

Un sorter opera mediante un conjunto de tecnologías que incluyen sensores, scanners y cintas transportadoras, entre otros. Cuando un producto entra en el sistema, es escaneado para determinar sus características y destino. Posteriormente, el sorter lo dirige a través de cintas o rieles hasta la ubicación correspondiente. Los sistemas avanzados de clasificación de productos utilizan incluso inteligencia artificial para aumentar la eficiencia y precisión del sorteo.

Tecnologías que implementan los sistemas sorting

Los sistemas de sorting, o sistemas de clasificación de productos, se apoyan en una serie de tecnologías de vanguardia para realizar sus tareas de manera eficaz y precisa. La integración de estas tecnologías permite que los sistemas sorting respondan a las demandas de rapidez y exactitud que los entornos de trabajo actuales

requieren. Entre las tecnologías más destacadas se incluyen:

- Sensores y Detectores: Utilizados para identificar las características físicas de los productos, como tamaño, peso y forma.

- Códigos de Barras y RFID: Permiten el seguimiento y la identificación rápida de los productos durante el proceso de clasificación.

- Sistemas de Visión Artificial: Proporcionan el reconocimiento y la inspección visual de los artículos, incluso en condiciones de alta velocidad.

- Software de Gestión de Almacenes (WMS): Ofrece una integración con los sistemas de información del almacén para un mejor control y gestión del inventario.

- Robótica y Mecatrónica: Los brazos robóticos y los sistemas mecatrónicos avanzados posibilitan la manipulación y sorteo de productos con gran precisión.

- Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (Machine Learning): Contribuyen a la optimización de los flujos de trabajo, aprendiendo y adaptándose a los patrones de sorteo para mejorar continuamente la eficiencia.

- Cintas Transportadoras y Clasificadores: Diseñados para mover los productos a través del sistema de sorting de manera fluida y organizada.

- Sistemas de Control y Software de Monitoreo: Brindan la capacidad de supervisar en tiempo real el proceso de clasificación y hacer ajustes en el momento necesario.

Aplicaciones y usos de los sistemas de clasificación de productos

Las aplicaciones de los sistemas de clasificación de productos son variadas y pueden encontrarse en distintos sectores como el e-commerce, la industria farmacéutica, el sector de alimentos y bebidas, y más. Son especialmente valiosos en centros de distribución de gran volumen, donde la gestión efectiva del inventario es crucial. Además, los sistemas sorting son fundamentales en la gestión de devoluciones, una tarea que ha cobrado importancia con el auge de las compras en línea.

Ventajas de los sistemas sorting frente a otros

Las ventajas de los sistemas sorting frente a métodos de clasificación manuales o menos avanzados son numerosas. Ofrecen mayor precisión, reducen errores y tiempos de inactividad, y permiten un procesamiento más rápido de los pedidos. Esto no solo optimiza la gestión de la cadena de suministro, sino que también contribuye a la sostenibilidad operativa, ya que se minimiza el desperdicio de recursos y se maximiza la eficiencia energética.

Un avance significativo en esta área es el uso de sensores hiperespectrales que capturan información detallada en múltiples longitudes de onda, más allá del espectro visible. El proyecto WRAP UK ha implementado esta tecnología para mejorar la identificación de materiales plásticos y otros polímeros, logrando una clasificación más precisa y eficiente (WRAP, 2023). Estos sensores permiten detectar variaciones químicas sutiles que los métodos tradicionales no reconocen, lo que se traduce en una reducción considerable de residuos impropios en las corrientes reciclables.

Innovaciones Patentadas: Algoritmos Avanzados para la Identificación de Polímeros

El desarrollo de algoritmos para la identificación automatizada de polímeros en plantas de reciclaje es un referente en este campo. Muchas de estas tecnologías de IA describen un sistema que utiliza análisis espectral avanzado y aprendizaje automático para distinguir polímeros incluso en mezclas complejas o contaminadas. El algoritmo procesa datos hiperespectrales y morfológicos para clasificar plásticos con alta precisión, lo que permite optimizar la segregación en tiempo real y mejorar la calidad del material recuperado.

Este avance es crucial porque la correcta identificación de polímeros determina la viabilidad técnica y económica del reciclaje, evitando que materiales incompatibles contaminen lotes reciclados. Además, el sistema incorpora capacidad de aprendizaje continuo, adaptándose a nuevos materiales y condiciones operativas, lo que lo hace escalable y robusto para distintas plantas industriales.

Se puede citar un nivel significativo de desarrollo de tecnologías patentadas con gran impacto en el área. Por ejemplo:

- US20240009710A1 propone un sistema que emplea marcadores químicos o trazadores incorporados en los plásticos, detectables mediante espectroscopía, lo que permite identificar polímeros incluso en materiales oscuros o complejos, incorporando blockchain para la trazabilidad de materiales reciclados.
 - US20220161298A1 describe un sistema de clasificación de plásticos basado en visión artificial y aprendizaje automático, que utiliza imágenes espectrales y redes neuronales para identificar distintos polímeros en tiempo real.
 - US20220027590A1 introduce marcas digitales impresas en envases plásticos, legibles mediante visión por computadora, que contienen información codificada sobre el tipo de polímero, mejorando la clasificación sin necesidad de sensores costosos.
 - US10799915B2 detalla un sistema basado en inteligencia artificial que identifica objetos reciclables en cintas transportadoras mediante análisis visual y redes neuronales, con mecanismos automáticos de separación según material.
- En el ámbito internacional, existen desarrollos similares. En Europa, la empresa suiza TOMRA, quizá más conocida en Noruega por sus máquinas de vending inverso para envases de bebidas para su reciclaje, lleva más de 50 años innovando. A principios de este año, TOMRA presentó un avance para la próxima generación de soluciones de vending inverso, con el objetivo de preparar el futuro de la devolución de depósitos y redefinir la experiencia del reciclaje, tanto para los minoristas como para los usuarios finales. El año pasado, TOMRA consiguió el puesto número 10 en los premios, donde competía con 25 empresas relevantes que trabajan activamente en el ámbito de la innovación en el campo del reciclaje. Este año TOMRA fue galardonada con el primer puesto, con este premio, TOMRA se sitúa a la altura de otros ganadores y potencias noruegas como Posten y Aker Biomarine, entre otras.

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN



**SENSORES Y
DETECTORES**



**CÓDIGOS DE BARRAS
Y RFID**



**SOFTWARE DE
GESTIÓN DE
ALMACÉN**



**ROBÓTICA Y
MECATRÓNICA**



**TRANSPORTADORES
Y CLASIFICADORES**



**INTELIGENCIA
ARTIFICIAL Y
APRENDIZAJE
AUTOMÁTICO**

Otras compañías como ZenRobotics aplican robótica inteligente utilizando Inteligencia Artificial (IA) para automatizar la clasificación de residuos y acabar con la clasificación manual gracias a robots de clasificación seguros. ZenRobotics cuenta una potente IA industrial con más de una década de experiencia en el reconocimiento y clasificación de materiales reciclables de alta calidad de todo el mundo. Sus robots están ayudando a los operadores en más de 15 países de todo el mundo a extraer mayor valor de los residuos, obtener datos procesables y alcanzar ambiciosos objetivos de economía circular. En América Latina, aunque la adopción es más incipiente, empresas de alta tecnología en Brasil y México están comenzando a implementar sistemas de visión artificial para mejorar la clasificación en plantas municipales, integrando tecnologías de IA adaptadas a la realidad local.

“
**...ZenRobotics
 aplica robótica
 inteligente
 utilizando
 IA para
 automatizar la
 clasificación de
 residuos...**”

Eficiencia Comprobada en Centros Piloto

Los beneficios de la IA en la clasificación de residuos han sido validados en estudios recientes. Algunos como los referidos debajo presentan una revisión exhaustiva sobre el impacto de sistemas impulsados por IA

1. Hacia un reciclaje artificialmente inteligente: Mejorando el procesamiento de imágenes para la clasificación de residuos

Begum, S., Puthal, D., & Wang, H. (2021). Towards artificially intelligent recycling: Enhancing image processing for waste classification. arXiv preprint, arXiv:2108.06274. <https://arxiv.org/abs/2108.06274>

- Resumen: Este estudio se basa en el proyecto Wastenet de IBM, que busca mejorar el reciclaje utilizando IA para la clasificación de residuos. Utiliza técnicas de aprendizaje por transferencia y aumento de datos para mejorar la precisión de la clasificación. El modelo desarrollado logra una precisión de prueba del 91.21%, que mejora al 95.40% con técnicas de aumento de

datos. El estudio proporciona detalles completos sobre el entrenamiento del modelo y demuestra que puede realizar una clasificación exitosa en tiempo real de artículos de desecho reciclables utilizando una cámara web estándar.

2. Inteligencia artificial para la gestión de residuos en ciudades inteligentes: una revisión

Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(40), 96175–96205. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28417-7>

- Resumen: Este artículo revisa los avances en la aplicación de la IA en la gestión de residuos dentro del contexto de ciudades inteligentes. Se discuten diversas técnicas de IA, como redes neuronales artificiales y máquinas de vectores de soporte, y su implementación en sistemas de tratamiento de residuos. Además, se analizan los desafíos y oportunidades asociados con la integración de la IA en la gestión de residuos urbanos.

3. Desarrollo de un modelo de inteligencia artificial para reconocer residuos de construcción mediante la aplicación de aumento de datos de imagen y aprendizaje por transferencia

Park, H., Lee, S., & Kim, H. (2022). Development of an artificial intelligence model for recognizing construction waste through the application of image data augmentation and transfer learning. *Buildings*, 12(2), 175. <https://doi.org/10.3390/buildings12020175>

- Resumen: Este estudio se centra en el desarrollo de un modelo de IA capaz de reconocer residuos de construcción utilizando técnicas de aumento de datos y aprendizaje por transferencia. Se emplean redes neuronales convolucionales para mejorar la precisión en la clasificación de residuos, lo que puede ser útil en entornos de plantas piloto donde se manejan diversos tipos de desechos.

Los estudios mencionados ofrecen una visión detallada sobre cómo la IA está revolucionando la clasificación de residuos, mejorando la eficiencia, reduciendo costos y contribuyendo a prácticas más sostenibles. Estos estudios proporcionan una visión integral de cómo la inteligencia artificial está transformando la clasificación y gestión de residuos, especialmente en entornos de plantas piloto y ciudades inteligentes. Estos resultados evidencian que la integración de machine learning y robótica no es una tendencia futura, sino una realidad tangible que está transformando la gestión de residuos hacia modelos más sostenibles y eficientes.

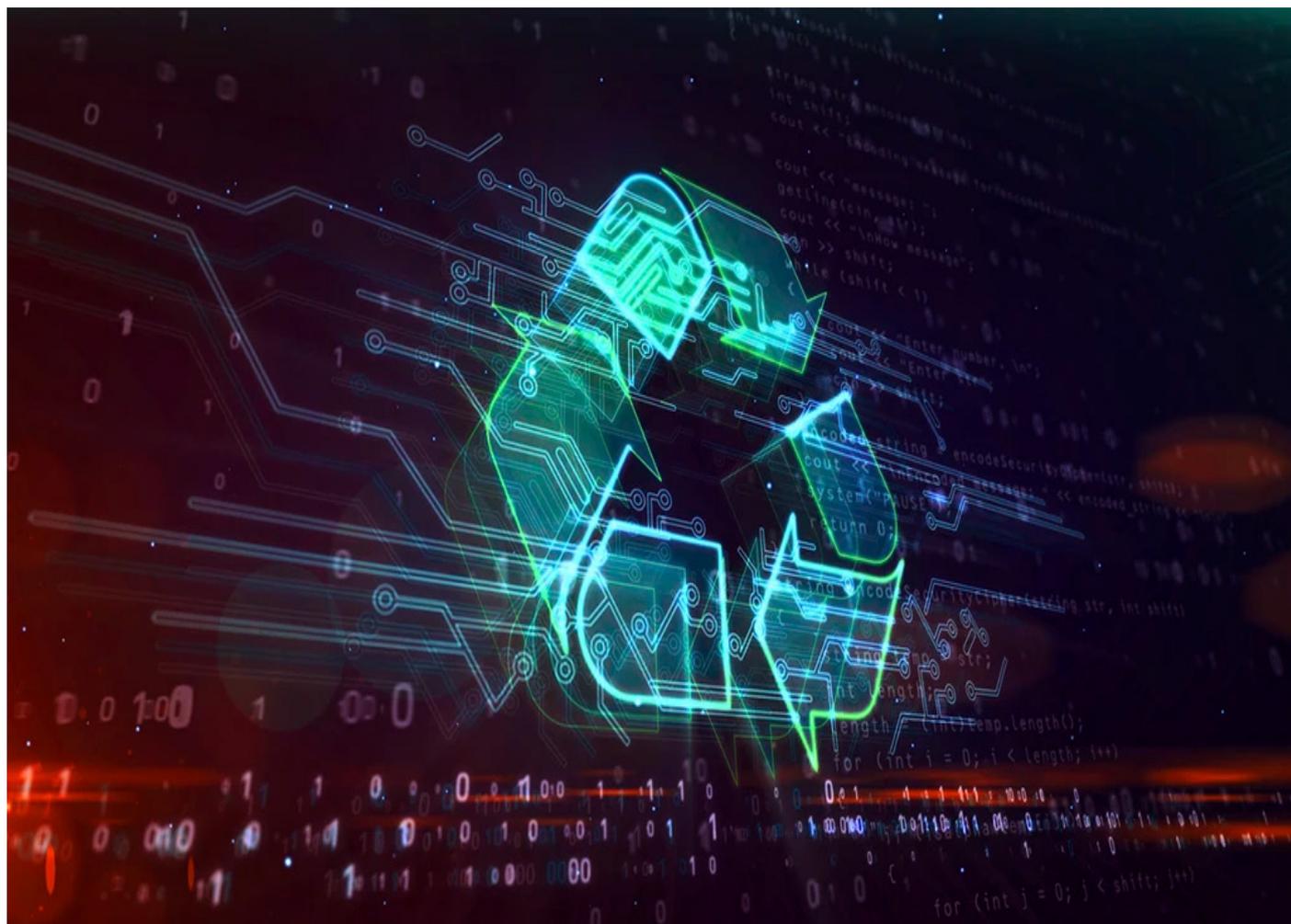
Conclusión

La inteligencia artificial, a través de machine learning, visión artificial y robótica avanzada, está transformando la clasificación de productos para reciclaje, habilitando una economía circular por producto más efectiva. Innovaciones patentadas como US20240009710A1, US20220161298A1,

US20220027590A1 y US10799915B2, demuestran que la automatización inteligente mejora la precisión, velocidad y calidad del reciclaje.

Estas tecnologías permiten identificar polímeros con gran exactitud incluso en flujos complejos, mejorar la pureza de los materiales recuperados, e integrar trazabilidad y aprendizaje adaptativo a los procesos. Además, su escalabilidad y compatibilidad con sensores ópticos avanzados las hacen viables en diversos contextos industriales y geográficos.

Estos avances permiten maximizar la recuperación de materiales, reducir la contaminación cruzada y optimizar recursos, contribuyendo a un modelo sostenible donde cada producto y material retorna al ciclo productivo con el mayor valor posible. El desafío ahora es acelerar la adopción global de estas tecnologías y fomentar la colaboración entre empresas, gobiernos y centros de innovación para consolidar sistemas de reciclaje inteligentes, adaptables y plenamente circulares.



Metodologías para la Recuperación de Metales Críticos en Residuos Electrónicos

(Primera Parte)



¿Sabía que los residuos electrónicos contienen metales valiosos en concentraciones mucho mayores que los yacimientos minerales tradicionales? En un mundo cada vez más digitalizado, la gestión eficiente y sostenible de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se ha convertido en una prioridad estratégica para la industria del reciclaje y la economía circular. La recuperación de metales críticos como litio (Li), cobalto (Co) y oro (Au) no solo representa un desafío tecnológico, sino también una oportunidad para reducir la dependencia de materias primas vírgenes y mitigar el impacto ambiental de la minería convencional.

La recuperación de metales críticos a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representa actualmente uno de los mayores desafíos y oportunidades dentro de la gestión de residuos a nivel mundial. El auge exponencial de la producción y consumo de dispositivos electrónicos ha generado una acumulación sin precedentes de estos residuos, que contienen concentraciones significativas de materiales estratégicos como litio, cobalto y oro, entre otros metales de alto valor. Las técnicas convencionales de reciclaje han demostrado ser insuficientes ante la complejidad de estos resi-

duos, lo que ha impulsado el desarrollo de metodologías avanzadas como la hidrometalurgia y la biolixiviación. Estas tecnologías emergentes están transformando el concepto de "residuo" en "recurso", estableciendo las bases para una verdadera minería urbana sostenible que contribuya significativamente a la economía circular y a la independencia estratégica de materias primas críticas en Europa y el mundo.

Este artículo explora estas tecnologías, vinculando estos avances con la importancia de la circulación de productos en el reciclaje. Además, se analizan proyectos europeos de vanguardia y el impacto creciente de la minería urbana, como soluciones innovadoras y respetuosas con el medio ambiente hacia un modelo de reciclaje más eficiente, sostenible y competitivo.

[El desafío de los RAEE y los materiales críticos](#)

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos constituyen uno de los flujos de residuos de mayor crecimiento a nivel global, caracterizados por su compleja composición y alto contenido en materiales valiosos. Las placas de circuito impreso (PCB), componentes típicos de estos residuos, contienen una gran variedad de metales y no metales, convirtiéndolas en objetivo prioritario

para las técnicas de recuperación avanzadas.

Los RAEE constituyen una “mina urbana” de alto valor, con concentraciones de metales críticos que superan ampliamente las encontradas en explotaciones mineras tradicionales. Sin embargo, su compleja composición dificulta la recuperación eficiente de metales valiosos. El litio y el cobalto, fundamentales para baterías recargables, y el oro, indispensable en circuitos electrónicos, son cada vez más demandados y escasos (Baldé et al., 2024).

La Unión Europea ha identificado varios de estos elementos como Materias Primas Críticas (CRM), debido a su importancia económica y riesgo de suministro, entre los que destacan el tungsteno, niobio, tantalio, y tierras raras.

La extracción primaria de estos metales conlleva altos costos ambientales y sociales, por lo que el reciclaje se perfila como una alternativa ineludible para cerrar el ciclo de materiales y reducir la presión sobre los recursos naturales (INAPI, 2023).

El reciclaje eficiente de RAEE representa un reto significativo debido a su heterogeneidad y complejidad estructural. Los métodos tradicionales de tratamiento, como la pirometalurgia y los procesos informales de reciclaje, generan pro-

oportunidad económica significativa. Según datos disponibles, el reciclaje de un millón de teléfonos móviles puede proporcionar hasta 34 kg de oro, con un grado de pureza superior al obtenido mediante minería convencional.

Esta realidad refuerza la importancia estratégica de desarrollar métodos avanzados de recuperación de metales a partir de RAEE. La economía circular se basa en la circulación continua de productos, componentes y materiales, minimizando la generación de residuos y la extracción de recursos naturales. En este contexto, la recuperación eficiente de metales críticos de los RAEE es un eslabón esencial. No solo permite preservar recursos estratégicos, sino que también reduce la huella ambiental asociada a la producción y el consumo de dispositivos electrónicos.

La circulación por productos: un eje esencial para la sostenibilidad

La economía circular va más allá del reciclaje; implica mantener los materiales y productos en uso el mayor tiempo posible, maximizando su valor y minimizando la extracción de recursos vírgenes. La economía circular no solo promueve el reciclaje, sino que enfatiza la circulación continua de productos, componentes y materiales para mantenerlos en uso el mayor tiempo posible. En este marco, la circulación por productos -que incluye la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje avanzado- es fundamental para reducir la demanda de materias primas vírgenes y mitigar los riesgos asociados a la escasez de metales críticos.

Actualmente, la cantidad de metales en circulación es insuficiente para cubrir la creciente demanda, lo que hace imprescindible no solo reciclar más, sino también fomentar modelos de negocio que prolonguen la vida útil de los productos y faciliten la recuperación eficiente de materiales al final de su ciclo. Así, las tecnologías avanzadas de recuperación en RAEE permiten reincorporar metales críticos a la cadena productiva, cerrando el ciclo y fortaleciendo la circulación por productos.

Hidrometalurgia: Precisión y eficiencia en la recuperación de metales

La hidrometalurgia es una técnica basada en procesos químicos que utiliza soluciones acuo-



blemas ambientales secundarios y riesgos para la salud ocupacional.

Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes, capaces de responder a las crecientes necesidades de materiales estratégicos en industrias clave como la electrónica, energías renovables y movilidad eléctrica.

La gestión adecuada de estos residuos no solo contribuye a mitigar los impactos ambientales negativos, sino que también representa una

sas para disolver y recuperar metales de matrices complejas como baterías y placas de circuito impreso (PCBs).

El nombre de hidrometalurgia se refiere al empleo generalizado de soluciones acuosas como agente de disolución para la extracción de metales y para la producción de sustancias inorgánicas a partir de minerales a través de soluciones acuosas. La hidrometalurgia es el proceso en cual se obtiene el mineral puro de interés con base en reacciones químicas en solución acuosa. Este proceso de fundición metálica separa los componentes de destino de la pre-car del mineral en un entorno de fase líquida, se realiza para minerales que son solubles, que en general corresponden a minerales oxidados y también se puede utilizar para recuperar elementos valiosos del barro rojo.

La hidrometalurgia ha emergido como una de las tecnologías más prometedoras para la recuperación de metales valiosos a partir de residuos electrónicos, destacando por su selectividad y

menor impacto ambiental en comparación con los métodos pirometalúrgicos. Esta tecnología se basa en la utilización de soluciones acuosas, ácidas o básicas, para disolver selectivamente los metales de interés mediante procesos de lixiviación.

Los procesos hidrometalúrgicos comprenden varias etapas secuenciales: pretratamiento físico de los residuos, lixiviación química para solubilizar los metales, separación de impurezas, concentración y purificación de los metales de interés, y finalmente recuperación del metal en forma sólida.

La eficiencia del proceso depende de factores críticos como la concentración del agente lixivante, temperatura, tiempo de reacción y relación sólido/líquido, los cuales deben ser optimizados para cada tipo específico de residuo.

En el caso particular de las baterías ion-litio, estudios recientes han demostrado la viabilidad técnica de la recuperación de litio y cobalto mediante lixiviación con ácido cítrico.

Entendiendo la gestión de la chatarra electrónica

La chatarra electrónica se refiere a todos aquellos dispositivos electrónicos que han llegado al final de su vida útil o que ya no son funcionales.

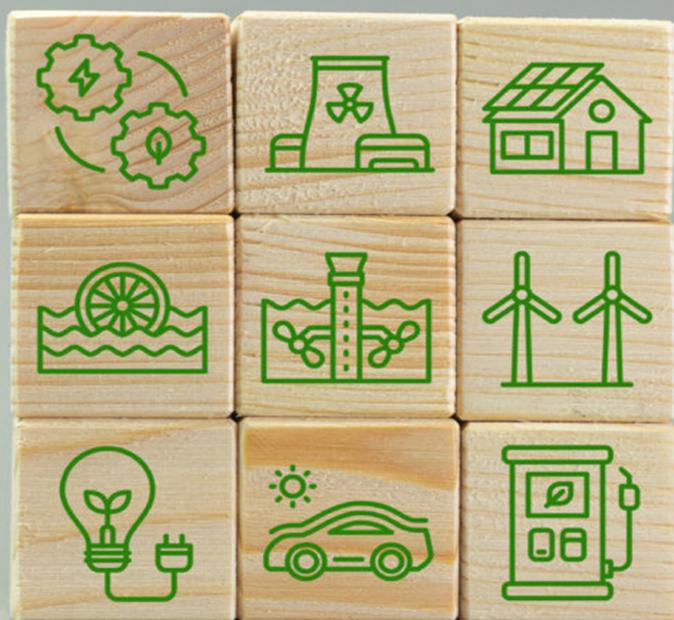


Anualmente se desechan millones de toneladas de estos dispositivos, liberando materiales tóxicos que pueden contaminar nuestro entorno.

Cada individuo produce cerca de 6 kg de residuos electrónicos al año, lo que refleja la magnitud del problema a escala global.



Reciclar no solo protege el medio ambiente, sino que también permite recuperar y reutilizar recursos valiosos, dándoles una nueva oportunidad de uso.



EMPRESA DE INGENIERIA DEL RECICLAJE

Calle Zapata #1558 e/ Paseo y 2. Vedado.Plaza de la Revolución. Cuba



observatorio@isde.co.cu



observatorio.reciclaje.cu



[observatorio-cubano-del-reciclaje](https://www.linkedin.com/company/observatorio-cubano-del-reciclaje)



[observatorio tecnologico](https://www.facebook.com/observatorio-tecnologico)