

# Tecnologías Habilitadoras Digitales en la Economía Sostenible y Circular

**Introducción.** En la era de la transformación digital, las *Tecnologías Habilitadoras Digitales (THD)* desempeñan un papel crucial en impulsar la innovación hacia una economía más sostenible<sup>[1]</sup>. Las THD son un conjunto de herramientas y sistemas tecnológicos (Internet de las Cosas, Big Data, Inteligencia Artificial, blockchain, robótica, etc.) que actúan como catalizadores para optimizar procesos, conectar datos, personas y sistemas, y habilitar nuevos modelos de negocio más eficientes y respetuosos con el medio ambiente<sup>[2]</sup>. Estas tecnologías, aplicadas de forma transversal en sectores como la industria, la logística, la energía o la ciudad inteligente, permiten **mejorar el diseño de productos, hacer la fabricación más limpia y eficiente, optimizar la logística y la trazabilidad de la cadena de suministro, ahorrar energía y extender el ciclo de vida de los bienes**. En este capítulo exploraremos detalladamente cómo las THD contribuyen a la transición de un modelo económico lineal tradicional hacia un modelo de **economía circular** y sostenible, analizando sus conceptos técnicos fundamentales, casos de uso reales, últimas tendencias, y su influencia en los procesos productivos, los modelos de negocio y la creación de nuevos mercados y empleos.

## De la economía lineal a la economía circular: marco histórico y definiciones

La **economía lineal** es el modelo industrial tradicional caracterizado por la secuencia “*tomar, hacer y desechar*”. En este sistema se extraen materias primas, se producen bienes y tras su uso se desechan como residuos, sin considerar su huella ambiental ni el aprovechamiento posterior de los materiales<sup>[3]</sup>. Este paradigma lineal, dominante desde la Revolución Industrial, prioriza el beneficio económico inmediato y el consumo, obviando la sostenibilidad a largo plazo – los productos se fabrican para ser usados y tirados, y el ciclo de vida termina en vertederos<sup>[4][5]</sup>.

Frente a este modelo surge la **economía circular**, un concepto introducido a partir de los años 1980 para replantear la relación entre la economía y el medio ambiente<sup>[6]</sup>. La economía circular es un modelo de producción y consumo sostenible que busca mantener los productos, componentes y materiales en uso el mayor tiempo posible, minimizando tanto la entrada de recursos vírgenes como la generación de desechos<sup>[7]</sup>. Se basa en los principios de **reducir, reutilizar y reciclar** (las “3R”) durante todo el ciclo de vida de un producto<sup>[8]</sup>. Esto implica diseñar productos que consuman menos energía (y que esta sea renovable), usar materias primas no tóxicas, alargar la vida útil

de los bienes mediante reparación y remanufactura, y asegurar que al final de su vida sean reciclables o valorizables<sup>[9]</sup>. En contraste con la economía lineal, que pone el foco solo en la rentabilidad sin preocuparse por el ciclo de vida completo, la economía circular antepone la **sostenibilidad** y la optimización de recursos en todas las etapas productivas<sup>[5]</sup>.

**Importancia de la transición:** La transición desde la economía lineal hacia la circular responde a la necesidad de frenar la creciente presión ambiental (cambio climático, pérdida de biodiversidad, contaminación) derivada del modelo de “usar y tirar”. Una economía circular busca desvincular el crecimiento económico del consumo indiscriminado de recursos finitos, creando sistemas más **resilientes y regenerativos**<sup>[10]</sup>. Además, la adopción de modelos circulares puede incrementar la **competitividad e innovación empresarial**, al tiempo que genera nuevas oportunidades de empleo en sectores verdes. De hecho, la Comisión Europea estima la creación de unos 700.000 nuevos puestos de trabajo en los próximos años gracias a la economía circular, con un aumento adicional del PIB de la UE de alrededor del 0,5%<sup>[11]</sup>. En síntesis, se trata de una transformación económica profunda que replantea desde el diseño de los productos hasta el final de su vida útil, apoyándose en parte en las tecnologías digitales para lograrlo.

*(Podemos visualizar la diferencia entre ambos modelos económicos comparando sus cadenas de producción. En la economía lineal los productos siguen un flujo unidireccional: extraer materia prima → producir → distribuir → consumir → desechar. En la economía circular, en cambio, tras el consumo los bienes se recogen, reciclan o remanufacturan para reintroducir sus materiales como materias primas secundarias en la producción, formando un ciclo cerrado regenerativo.)*<sup>[9][12]</sup>

## Principales Tecnologías Habilitadoras Digitales (THD) y sus conceptos clave

A continuación, se presentan las principales **tecnologías habilitadoras digitales** involucradas en la transformación hacia procesos más sostenibles y eficientes. Cada subsección ofrece una definición clara y ejemplos pedagógicos de su aplicación:

### Internet de las Cosas (IoT)

El **Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things)** se refiere a la interconexión digital de objetos cotidianos y dispositivos físicos a Internet, equipándolos con sensores y software para recopilar y transmitir datos en tiempo real<sup>[13]</sup>. En el contexto industrial (IIoT, Internet Industrial de las Cosas), esto significa desplegar redes de sensores en máquinas, vehículos, productos o infraestructuras que monitorizan parámetros

continuamente (temperatura, vibración, ubicación, etc.)[\[14\]](#). La información captada permite obtener visibilidad instantánea sobre procesos antes opacos.

*Ejemplo:* en una fábrica inteligente, sensores IoT en la maquinaria pueden detectar **anomalías** (por ejemplo, vibraciones inusuales en un motor) y disparar alertas de **mantenimiento predictivo** antes de que ocurra una avería[\[15\]](#). De este modo se programa una intervención a tiempo y **se evita una parada inesperada**, ahorrando costos y prolongando la vida de los equipos. El IoT también se aplica en logística (seguimiento en tiempo real de envíos), en agricultura de precisión (sensores de humedad del suelo para optimizar riego) o en ciudades inteligentes (sensores de tráfico, iluminación y calidad de aire para gestionar eficientemente los recursos urbanos). En todos los casos, IoT contribuye a **optimizar recursos y reducir desperdicios** mediante la información en tiempo real.

## Big Data y Analítica de Datos

El término **Big Data** alude a los grandes volúmenes de datos (estructurados o no estructurados) que se generan constantemente en la era digital, y a las tecnologías y métodos para almacenarlos, procesarlos y extraer de ellos información valiosa. Las herramientas de Big Data y **analítica avanzada** permiten a las organizaciones procesar ingentes cantidades de información para identificar **patrones, tendencias y relaciones ocultas** que serían indetectables manualmente[\[16\]](#).

En combinación con técnicas de **Inteligencia Artificial (IA)** –especialmente el **aprendizaje automático (Machine Learning)**–, los datos se convierten en conocimiento accionable. La IA puede aprender de los datos históricos y en tiempo real para **tomar decisiones autónomas o recomendaciones** optimizando así operaciones complejas[\[17\]](#).

*Aplicaciones:* En industria y sostenibilidad, Big Data e IA se usan para infinidad de fines: **predecir fallos** en equipos antes de que ocurran (mantenimiento inteligente), **optimizar líneas de producción** ajustando parámetros para minimizar desperdicios, **mejorar la calidad** detectando anomalías en tiempo real, o **gestionar eficientemente la energía** ajustando consumos según patrones de uso[\[18\]](#). Por ejemplo, empresas como Google han aplicado IA para optimizar la climatización de sus centros de datos, logrando reducir hasta un 40% el consumo energético de refrigeración mediante análisis predictivo de Big Data. En logística, algoritmos de IA analizan rutas de miles de vehículos para trazar entregas más cortas y con menos emisiones. Gracias al Big Data, las decisiones se basan en evidencia objetiva, lo que redunda en **procesos más eficientes y sostenibles** al minimizar insumos y residuos.

Cabe destacar las **IA generativas** de última generación (como ChatGPT), que si bien nacieron enfocadas a lenguaje e imágenes, comienzan a tener un papel en entornos industriales. Estas IA pueden ayudar a sintetizar informes automáticamente, asistir a operarios con instrucciones dinámicas o incluso generar diseños industriales optimizados[19]. Por ejemplo, se explora el uso de IA generativa para sugerir diseños de productos más ligeros o con formas que requieran menos material, contribuyendo al ecodiseño. Aunque es una tendencia emergente, ilustra cómo la IA sigue evolucionando y abriendo nuevas posibilidades.

## Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático

**Inteligencia Artificial (IA)** es la rama de la informática que busca crear sistemas capaces de realizar tareas que típicamente requieren inteligencia humana: desde reconocer imágenes o voz, hasta tomar decisiones basadas en datos. Dentro de la IA, el **aprendizaje automático (Machine Learning)** y particularmente el **aprendizaje profundo (Deep Learning)** emplean redes neuronales y algoritmos que permiten a las máquinas aprender de grandes conjuntos de datos y mejorar su desempeño con la experiencia[20].

En la práctica, la IA en la industria 4.0 complementa al Big Data: una vez que los datos son recopilados (por sensores IoT, sistemas de producción, etc.), los algoritmos de IA analizan esa información para **detectar patrones complejos, predecir eventos futuros y optimizar operaciones** sin intervención humana. Por ejemplo, una IA puede predecir con alta precisión la demanda de un producto, ayudando a planificar la producción justo a tiempo y evitando excedentes (lo que reduce inventarios ociosos y desperdicio de materiales). Otras aplicaciones incluyen **visión artificial** para control de calidad automatizado (detectando defectos en una línea de ensamblaje a velocidades imposibles para un humano) y **sistemas de apoyo a decisiones** que sugieren al operador ajustes óptimos para minimizar consumos energéticos en tiempo real.

Una subcategoría cada vez más relevante es la **IA generativa**, capaz de crear contenido nuevo (texto, imágenes, diseños) a partir de aprender patrones. En un entorno sostenible, la IA generativa puede emplearse para *generative design*: dado un conjunto de requisitos, el algoritmo propone diseños de piezas o productos que cumplan la función requerida usando la mínima cantidad de material, o con geometrías que maximizan la durabilidad. Este enfoque asistido por IA puede revolucionar el **diseño ecológico**, encontrando soluciones innovadoras que un ingeniero quizás no imaginaría por sí solo.

En resumen, la IA potencia a las demás THD al convertir los datos en acciones óptimas. Su capacidad de autoaprendizaje la hace muy valiosa para adaptarse a

entornos cambiantes y alcanzar **niveles de eficiencia inéditos**, esenciales en una economía que busca hacer más con menos recursos.

## Gemelos Digitales (Digital Twins) y Simulación

Un **gemelo digital** es una réplica virtual de un objeto, proceso o sistema físico, que se alimenta de datos reales en tiempo casi real para imitar el comportamiento del original[\[21\]](#). A través de sensores IoT que envían información constante sobre el estado de un activo físico (máquina, producto, infraestructura), el gemelo digital permite **monitorizar, simular y optimizar** su desempeño en un entorno virtual. Esta tecnología lleva la clásica simulación un paso más allá: no solo modela escenarios hipotéticos, sino que refleja el estado actual del sistema y predice su evolución.

En la práctica, los gemelos digitales facilitan enormemente el **diseño y mantenimiento** de productos complejos. Por ejemplo, compañías como Siemens o General Electric utilizan gemelos digitales de turbinas y motores industriales para analizar su rendimiento, predecir fallas y ajustar parámetros de operación automáticamente[\[22\]](#). Esto permite optimizar el uso de los equipos y **extender su vida útil**, ya que se pueden detectar desgastes o ineficiencias tempranamente y corregirlos antes de que causen daños mayores. Durante la fase de **diseño de producto**, un gemelo digital posibilita probar cambios o mejoras en un modelo virtual sin necesidad de construir prototipos físicos, ahorrando materiales y energía[\[23\]](#). Se pueden simular distintas condiciones de uso o entornos extremos para garantizar la durabilidad y reparabilidad del futuro producto, incorporando principios de ecodiseño desde el inicio.

Otro campo de aplicación es el de la **operación de plantas y ciudades**: existen gemelos digitales de fábricas enteras o incluso de ciudades inteligentes que, mediante datos en vivo, ayudan a los gestores a tomar decisiones óptimas. Por ejemplo, una ciudad puede tener un gemelo digital de su red de agua o eléctrica para simular escenarios de demanda y así equilibrar cargas, reduciendo pérdidas y evitando apagones. Igualmente, en logística de reciclaje, un gemelo digital del flujo de residuos podría modelar cómo mejorar la recolección y clasificación para maximizar la recuperación de materiales.

En definitiva, los gemelos digitales actúan como un puente entre lo físico y lo virtual, aportando **transparencia a lo largo del ciclo de vida** de productos y procesos. Al asegurar un flujo transparente de datos específicos del producto de extremo a extremo, se facilita la toma de decisiones que mejoran la circularidad (por ejemplo, decidir si reparar o remanufacturar un equipo basándose en su historial detallado)[\[24\]](#). Esta visión integral es clave para avanzar hacia una economía circular donde nada se desperdicia.

## Blockchain y tecnología de registros distribuidos

**Blockchain** es una tecnología de registro distribuido que permite almacenar transacciones y datos de forma **segura, descentralizada e inmutable** a lo largo de una cadena de bloques verificados criptográficamente. En otras palabras, es como un libro de contabilidad digital compartido por muchos nodos, donde una vez que se registra una información no puede ser alterada sin consenso de la red<sup>[25]</sup>. Si bien nació para soportar criptomonedas, el blockchain ha encontrado aplicaciones potentes en trazabilidad de cadenas de suministro y certificación de datos, aspectos esenciales para la sostenibilidad.

En una **cadena de suministro circular**, asegurar la trazabilidad completa de los materiales es fundamental: conocer el origen de las materias primas, los procesos por los que pasó un producto, sus componentes, reparaciones, y qué ocurre al final de su vida útil. Blockchain aporta valor aquí al permitir **registrar y verificar en tiempo real** cada evento relevante de forma transparente y fiable<sup>[26]</sup>. Por ejemplo, combinada con IoT, esta tecnología puede certificar datos de sensores sobre la calidad o procedencia de un lote de material, creando un historial inviolable que acompaña al producto<sup>[26]</sup>.

*Ejemplo práctico:* la empresa química Covestro colaboró con la automotriz Porsche y la start-up Circularise para implementar blockchain en el seguimiento de plásticos dentro de coches. Crearon un “hilo digital” que actúa como gemelo de la pieza plástica a lo largo de la cadena de valor, registrando en blockchain la proporción de material reciclado y la huella de CO<sub>2</sub> de cada componente<sup>[27][28]</sup>. Esto proporciona **transparencia** sobre el contenido reciclado de cada pieza y su impacto, facilitando el cumplimiento de requisitos ambientales y ayudando a identificar oportunidades de mejora (p.ej., aumentar contenido reciclado o reducir emisiones en fabricación).

Otro caso: Coca-Cola ha utilizado blockchain para registrar y **recompensar el trabajo de recolectores informales de residuos en África**, integrando esa información en su cadena de suministro de plástico reciclado<sup>[29]</sup>. De este modo, la empresa puede hacer seguimiento de sus materiales reciclados “de la cuna a la cuna” y garantizar que provengan de prácticas responsables, al mismo tiempo que incentiva el reciclaje en comunidades vulnerables.

Además de trazabilidad, el blockchain permite automatizar acuerdos mediante *smart contracts* (contratos inteligentes). Por ejemplo, un contrato programado podría liberar un pago o un pedido de repuesto automáticamente cuando un sensor IoT registre que una pieza ha superado cierto umbral de uso. Esto reduce burocracia y mejora la **eficiencia logística**, eliminando intermediarios.

**Desafíos:** Cabe mencionar que, pese a sus ventajas, la tecnología blockchain tiene retos: algunas implementaciones consumen mucha energía (un punto a mejorar para que sea verdaderamente “verde”), y la colaboración entre múltiples actores de la cadena es necesaria para que su adopción sea eficaz<sup>[30][25]</sup>. No obstante, se están desarrollando plataformas más eficientes energéticamente y consorcios sectoriales para impulsar su uso. En balance, blockchain ofrece un marco prometedor para **construir confianza, transparencia y responsabilidad compartida** en cadenas de valor sostenibles.

## Robótica colaborativa y automatización avanzada

La **robótica colaborativa** se refiere a la nueva generación de robots diseñados para trabajar de forma segura codo con codo con los humanos en entornos compartidos. A diferencia de la robótica industrial tradicional (robots grandes detrás de vallas de seguridad, realizando tareas aisladas), los **cobots** son robots equipados con sensores avanzados, inteligencia artificial y diseño intrínsecamente seguro, de modo que pueden interactuar directamente con operarios humanos sin riesgo<sup>[31]</sup>. Son fáciles de reprogramar y adaptables, lo que permite una **automatización flexible** ideal para líneas de producción de lotes pequeños o variables<sup>[31]</sup>.

En la Industria 4.0, además de la colaboración humano-robot, también se habla de **robots autónomos** capaces de tomar decisiones en tiempo real basadas en datos del entorno<sup>[32]</sup>. Por ejemplo, vehículos guiados automatizados (AGVs) o robots móviles en almacenes utilizan sensores LIDAR y cámaras para navegar por la fábrica entregando piezas justo a tiempo, optimizando recorridos y evitando colisiones<sup>[33]</sup>. Estos sistemas reducen la necesidad de transporte manual de materiales, aumentando la eficiencia logística y disminuyendo tiempos muertos.

**Contribución a la sostenibilidad:** La robótica avanzada mejora la **precisión** y la **eficiencia** de multitud de procesos, lo que se traduce en menor desperdicio de materiales y menor consumo energético por unidad producida. Un robot programado para aplicar pintura en una pieza, por ejemplo, lo hará con la cantidad exacta y en la zona precisa, reduciendo sobrantes y emisiones de compuestos volátiles en el proceso. En tareas de montaje, los robots minimizan errores que luego generarían reprocesos o desechos. Además, al asumir labores peligrosas o ergonómicamente duras, pueden incrementar la seguridad laboral y reducir accidentes, evitando paradas imprevistas.

Un campo emergente es el uso de robótica en **clasificación y reciclaje de residuos**. Ya existen sistemas robotizados con visión artificial que identifican materiales reciclables en cintas transportadoras de basura y los separan más rápido de lo que podría hacerlo un operario humano, incrementando la tasa de recuperación de materiales valiosos. Estos robots de reciclaje pueden distinguir tipos de plástico o

metales y apartarlos adecuadamente, contribuyendo directamente a cerrar el ciclo de materiales en la economía circular.

En resumen, la robótica colaborativa aporta **flexibilidad y productividad** a la industria sostenible. Al conjugarse con otras THD (sensores IoT, IA para visión, 5G para comunicaciones en tiempo real, edge computing para control local[\[34\]](#)[\[35\]](#)), los robots se vuelven más inteligentes y útiles en entornos dinámicos. El resultado son procesos productivos que producen **más valor con menos recursos**, pieza clave de una economía sostenible.

## Fabricación aditiva (Impresión 3D)

La **fabricación aditiva**, comúnmente conocida como **impresión 3D**, es una tecnología que permite crear objetos tridimensionales añadiendo material capa por capa, en lugar de la fabricación sustractiva tradicional que quita material (tala, fresado, etc.). Esta técnica revolucionaria aporta varias ventajas en términos de sostenibilidad y economía circular:

- **Reducción de residuos de material:** al depositar solo el material necesario para construir la pieza, la impresión 3D prácticamente elimina la chatarra y recortes típicos de mecanizados. Por ejemplo, en la industria aeroespacial imprimir componentes complejos ahorra hasta un 90% del material en comparación con tallarlos de un bloque sólido[\[36\]](#). Esto implica menos consumo de materia prima y menos residuos que gestionar.
- **Geometrías optimizadas y ligeras:** la impresión 3D permite fabricar piezas con formas intrincadas imposibles de lograr por medios convencionales, como estructuras internas tipo celosía. Esto se usa para aligerar componentes manteniendo su resistencia, como en el caso de inyectores de combustible de motores de avión fabricados por GE Aviation mediante 3D, que resultan más **ligeros y eficientes en combustible**[\[37\]](#).
- **Producción bajo demanda y local:** con impresoras 3D es viable producir piezas donde y cuando se necesitan, reduciendo la necesidad de fabricar grandes lotes por anticipado (lo que a veces lleva a excedentes y desperdicio si no se usan) y disminuyendo también la huella de transporte al acercar la fabricación al consumidor o punto de uso. Por ejemplo, en mantenimiento, si una pieza de repuesto puede imprimirse in-situ en una planta de reciclaje o en una plataforma offshore, se evita tener que almacenarla por años o traerla desde lejos.

- **Facilita la reparación y repuestos para extender vida útil:** en la economía circular es clave poder reparar productos en vez de desecharlos. La impresión 3D puede fabricar repuestos descatalogados o personalizados para equipos antiguos, alargando así su uso. También permite procesos como el *refabricado* o remanufactura: p.ej., aplicar capa de material nuevo en superficies desgastadas de una pieza (tecnología de deposición) para restaurarla a condición funcional.

En suma, la fabricación aditiva aporta **eficiencia material, personalización y descentralización**. Ya se utiliza en sectores variados: medicina (prótesis a medida, implantes biodegradables), construcción (elementos arquitectónicos impresos con menos desperdicio de hormigón), moda (accesorios impresos bajo pedido evitando sobrestock), entre otros. Su contribución a un modelo circular reside en producir solo lo necesario, aprovechando al máximo cada gramo de materia prima, y facilitando cadenas de suministro más cortas y reactivas. A medida que los materiales imprimibles se diversifican (metales, biopolímeros reciclados, etc.) y se abaratan las máquinas, la impresión 3D será una aliada cada vez más importante para la **fabricación sostenible**.

## Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR)

Las tecnologías de **realidad virtual (VR)** y **realidad aumentada (AR)** ofrecen nuevas formas de visualizar y manipular información digital, con fuertes aplicaciones en educación, diseño y operaciones industriales:

- **Realidad Virtual (VR):** crea entornos digitales inmersivos en los que el usuario puede introducirse mediante gafas o simuladores, desconectándose del mundo físico. En un contexto industrial sostenible, la VR permite por ejemplo realizar **simulaciones y formaciones** sin recursos físicos: entrenar a técnicos en el manejo de una máquina compleja dentro de un entorno virtual fotorrealista, antes de que toquen la real, reduce riesgo de errores costosos y evita gastar materia prima en pruebas. También posibilita hacer recorridos virtuales por una planta productiva optimizada sin construirla, evaluando así diseños de fábrica o flujos logísticos para escoger la opción más eficiente energéticamente. La VR se aplica incluso en concienciación ambiental: experiencias virtuales que muestran el impacto de ciertos procesos ayudan a diseñar con más criterio ecológico.
- **Realidad Aumentada (AR):** superpone información digital al mundo real en tiempo real[38]. A través de gafas transparentes o la pantalla de una tablet/móvil, el usuario ve su entorno físico con capas de datos extra. Esto **facilita tareas de mantenimiento, montaje y logística**, ya que, por ejemplo, un operario de mantenimiento puede ver en sus gafas AR esquemas, instrucciones paso a paso o indicadores (temperaturas, presiones) sobre la propia máquina que está reparando[38]. Así se agiliza la labor y se reducen errores, contribuyendo a

alargar la vida de los equipos y evitar paradas. En logística, la AR puede guiar a un operario por el almacén mostrándole en el visor la ruta óptima para recoger un pedido, ahorrando tiempo y energía.

En diseño de productos, tanto VR como AR permiten **prototipar digitalmente**: un diseñador con AR puede visualizar cómo encaja una pieza en un equipo existente superponiendo el modelo 3D virtual en el objeto físico, detectando incompatibilidades antes de fabricar nada (evitando iteraciones físicas costosas). La VR, por su parte, deja que equipos remotos de ingenieros se reúnan en una misma “sala” virtual alrededor del modelo 3D de un producto para revisarlo colaborativamente<sup>[39]</sup>, acelerando la innovación y reduciendo la necesidad de maquetas reales o de viajes para reuniones de diseño.

En la actualidad, estas tecnologías se han vuelto más accesibles. Grandes empresas ya entrena a su personal con VR en procedimientos de seguridad o maniobras difíciles (reduciendo incidentes y pérdidas), y la AR está presente en mantenimiento de aeronaves, automoción y líneas de fabricación. Su aporte a la sostenibilidad es sutil pero importante: **reduce la necesidad de recursos físicos para prueba y error**, mejora la capacitación del personal (que comete menos fallos, evitando desperdicios) y en general acelera la implantación de mejoras en procesos productivos y de producto. Todo ello redunda en **mayor eficiencia y menos consumo** de materiales y energía para lograr un determinado resultado.

## Computación en la Nube (Cloud Computing) y Edge Computing

La **computación en la nube (cloud)** consiste en usar servidores remotos interconectados a través de Internet para almacenar datos y ejecutar aplicaciones, en lugar de hacerlo en infraestructuras locales propias. Este paradigma ofrece **escalabilidad, acceso ubicuo y ahorro de costos**, ya que las empresas pueden aprovechar centros de datos compartidos gestionados por terceros (p.ej. Amazon Web Services, Microsoft Azure) en vez de mantener sus propios servidores<sup>[40]</sup>. ¿Por qué es una tecnología habilitadora clave? Porque el cloud facilita que todas las demás THD funcionen de forma integrada: los datos de IoT recolectados en campo pueden enviarse a la nube para su análisis con Big Data e IA; los usuarios pueden acceder a plataformas de software avanzadas (diseño, simulación, logística) desde cualquier lugar como servicios en la nube (*Software as a Service*); y se puede colaborar en tiempo real en documentos y modelos sin barreras geográficas. En resumen, la nube provee la **columna vertebral** donde corren muchas soluciones digitales sostenibles.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la computación en la nube bien gestionada puede optimizar el uso de recursos informáticos: en vez de miles de pequeñas empresas con servidores infráutilizados (desperdiendo electricidad), un gran data

center en la nube consolida cargas de trabajo y emplea técnicas de virtualización para maximizar la eficiencia de los equipos. Los grandes proveedores además suelen invertir en energías renovables para sus instalaciones y en sistemas avanzados de refrigeración ecológica. Un ejemplo es cómo la **computación en la nube habilita modelos de negocio circulares**: plataformas de economía colaborativa (como las de compartir coche o alquilar productos) corren en la nube, conectando a miles de usuarios, lo que reduce la necesidad de que cada persona posea un objeto en propiedad (menos bienes producidos en total).

Junto al cloud, aparece el concepto de **Edge Computing**, o computación en el borde: llevar parte del procesamiento de datos cerca del origen donde se generan, en dispositivos locales o gateways, en lugar de enviarlo todo a la nube central. Esto es importante en entornos industriales en tiempo real o IoT masivo, ya que **reduce latencia y ancho de banda**. Por ejemplo, un robot colaborativo o un vehículo autónomo en fábrica procesará los datos de sus sensores localmente para reaccionar al instante (detenerse ante un obstáculo)[\[34\]](#), sin depender de que la instrucción venga desde un servidor remoto. El edge computing alivia las redes y permite respuesta rápida, lo cual es crítico para eficiencia y seguridad. Además, procesar datos en el borde puede implicar filtrar y enviar a la nube solo lo necesario, reduciendo el volumen de datos en tránsito y el consumo energético asociado al transporte de información.

En síntesis, la nube ofrece **potencia computacional flexible bajo demanda**, y el edge asegura **velocidad y autonomía** en el campo. Ambos modelos se complementan para sustentar las demás THD en aplicaciones complejas: desde monitorización ambiental distribuida (donde nodos edge analizan calidad del aire localmente y reportan a una base central solo promedios) hasta marketplaces globales de residuos industriales (basados en la nube, conectando empresas para reusar subproductos en otros procesos). Son infraestructuras digitales que, bien aprovechadas, contribuyen a la **eficiencia sistémica** y a habilitar servicios innovadores de la economía sostenible.

## Conectividad 5G y redes de nueva generación

Las redes de comunicaciones móviles de quinta generación, o **5G**, han sido incluidas entre las tecnologías habilitadoras por el salto cualitativo que suponen en **velocidad, capacidad y baja latencia** de conexión inalámbrica. El 5G permite tasas de transmisión de datos muchísimo mayores que 4G, con tiempos de respuesta del orden de milisegundos, y la conexión simultánea de una densidad altísima de dispositivos por antena. Esto habilita casos de uso impensables antes en entornos industriales y ciudades inteligentes.

En la práctica, **5G es fundamental para IoT masivo y aplicaciones en tiempo real**: por ejemplo, para coordinar decenas de robots móviles (AGVs) en una planta sin

cables, o para monitorizar en remoto maquinaria crítica con video de alta definición sin retrasos[41]. En logística, la baja latencia de 5G facilita el control a distancia de vehículos o grúas (teleoperación) aumentando seguridad y eficiencia. En entornos urbanos, 5G soporta la infraestructura de **ciudades inteligentes** con miles de sensores y actuadores distribuidos (semáforos conectados, alumbrado inteligente, contenedores de basura IoT que comunican su llenado, etc.), todo transmitiendo datos en tiempo real para optimizar servicios públicos. Un ejemplo en sostenibilidad es la gestión energética: 5G puede conectar multitud de paneles solares, baterías y electrodomésticos inteligentes en un barrio permitiendo una **red eléctrica inteligente** que equilibra la generación distribuida renovable con el consumo en cada momento.

Otro sector transformado es el de la **salud digital**: el 5G habilita telecirugía o monitoreo remoto de pacientes con dispositivos médicos conectados de alta fidelidad, mejorando el acceso a atención sanitaria sin desplazar personas (menos transporte, menos emisiones). También en agricultura se usa 5G para maquinaria autónoma y sensores en campos remotos donde antes no había conectividad suficiente.

En términos de sostenibilidad, la aportación de 5G es indirecta pero potente: al posibilitar todas estas aplicaciones IoT/IA en tiempo real, se logra una **gestión mucho más fina de recursos** (agua, energía, transporte) reduciendo desperdicios. Por ejemplo, en la cadena alimentaria, usar 5G para trazar en vivo la temperatura de alimentos perecederos en tránsito ayuda a evitar lotes echados a perder por rupturas de la cadena de frío. O en manufactura, la comunicación ultra-confiable entre máquinas vía 5G facilita el control de precisión que minimiza defectos.

Cabe señalar que la implementación de 5G debe ir acompañada de despliegue de muchas antenas y mayor consumo de hardware de red; por tanto, es clave gestionar su infraestructura de forma energéticamente eficiente para que el balance final sea positivo (usando equipos de telecomunicaciones de bajo consumo y energías renovables en su alimentación). Superado ese reto, 5G se perfila como el **sistema nervioso digital** de la economía conectada, imprescindible para escalar soluciones sostenibles basadas en datos.

## Ciberseguridad

La **ciberseguridad** no es una tecnología única sino un conjunto de prácticas y herramientas destinadas a proteger los sistemas digitales, las redes y los datos frente a ataques o accesos no autorizados. Se incluye entre las THD porque en la medida que digitalizamos procesos productivos y cadenas de suministro, la seguridad se vuelve crítica para su fiabilidad y continuidad[42]. Un ciberataque a una planta de fabricación inteligente podría detener la producción o provocar errores que generen grandes lotes de productos defectuosos (con el consecuente despilfarro de recursos). O la

manipulación de datos de sensores podría hacer que se tomen decisiones erróneas que impacten la calidad o seguridad de un producto sostenible. Por ello, **sin ciberseguridad no hay transformación digital confiable**.

En términos de sostenibilidad, asegurar la integridad y disponibilidad de los sistemas evita interrupciones inesperadas (que a veces implican descartes de material en proceso) y protege información sensible como registros de trazabilidad ambiental o certificados de origen que son la base de la confianza en la cadena. Por ejemplo, si una empresa declara que usa 50% de material reciclado en su producto y registra esa información en una plataforma digital, la ciberseguridad garantiza que esos datos no sean alterados o robados, manteniendo la **transparencia y veracidad** que exigen consumidores y reguladores.

Asimismo, implementar medidas de ciberseguridad robustas (control de accesos, encriptación, copias de respaldo, monitoreo de anomalías, etc.) es parte de la **resiliencia** de las nuevas cadenas de valor. La disruptión digital debe ir acompañada por una cultura de seguridad: formar al personal en buenas prácticas, preparar planes de contingencia y actualizar constantemente las defensas. Según estudios recientes, cerca del 30% de los ciberataques a infraestructuras críticas en 2023 afectaron entornos industriales[\[43\]](#), lo que demuestra la necesidad de invertir en este frente.

En resumen, la ciberseguridad actúa como **garante de la continuidad y la confianza** en los sistemas habilitados digitalmente. Solo con ella las empresas y usuarios se sentirán seguros de adoptar plenamente soluciones como IoT o blockchain, sabiendo que sus operaciones sostenibles no serán fácilmente comprometidas. Es, por tanto, un habilitador transversal de la economía digital verde.

---

Como hemos visto, cada una de estas tecnologías –ya sea conectando dispositivos, analizando datos masivos, automatizando decisiones o trazando productos– cumple un rol específico en la **revolución industrial 4.0 y sostenible**. Lo realmente potente es la sinergia entre ellas: combinadas conforman un ecosistema interconectado que está redefiniendo cómo **diseñamos, fabricamos, usamos y reciclamos** productos[\[44\]](#). A continuación, veremos concretamente cómo se aplican las THD a lo largo del ciclo de vida de un producto y en los distintos procesos productivos, orientados a lograr eficiencia y circularidad.

## Aplicaciones de las THD a lo largo del ciclo de vida del producto

Las tecnologías habilitadoras digitales contribuyen en cada etapa del **ciclo de vida del producto** –desde el diseño inicial hasta el fin de su vida útil– mejorando la **sostenibilidad y eficiencia** en todas las fases. A continuación se detalla su influencia:

### Diseño ecológico y desarrollo de productos

En la fase de **ideación y diseño**, las decisiones tomadas sobre materiales, forma y procesos de fabricación determinan en gran medida el impacto ambiental del producto. Aquí las THD ofrecen herramientas para un **ecodiseño más inteligente**:

- **Software CAD avanzado con simulación y gemelos digitales:** Permiten a los ingenieros modelar el producto virtualmente y simular su comportamiento bajo distintas condiciones (resistencia, desgaste, eficiencia energética) antes de fabricarlo. Esto ayuda a identificar mejoras que alarguen su vida o reduzcan consumos. Por ejemplo, se puede simular el flujo de aire en un diseño de electrodoméstico para optimizar la ventilación y así necesitar un motor más pequeño (menos material y energía en uso). Con gemelos digitales, además, es posible prever cómo se podría reciclar o desmontar el producto al final de su vida, incorporando esas consideraciones en el diseño desde el inicio.
- **Inteligencia Artificial en el diseño (*generative design*):** Como mencionamos, algoritmos de IA pueden generar automáticamente múltiples alternativas de diseño cumpliendo ciertos objetivos (minimizar peso, maximizar resistencia, etc.). Esto ha llevado a innovaciones como piezas con geometrías orgánicas complejas, esqueleto hueco tipo hueso, que usan significativamente menos material pero mantienen funcionalidad. Al explorar miles de opciones que un humano tardaría muchísimo en idear, la IA ofrece soluciones de diseño más eficientes y a menudo más sostenibles.
- **Realidad virtual y aumentada:** En la etapa de prototipado, las empresas emplean VR para evaluar la ergonomía y apariencia del producto en un entorno virtual, en lugar de construir numerosos prototipos físicos. Igualmente, con AR, un diseñador puede proyectar un componente virtual sobre un equipo existente para comprobar acoplos o tamaños. Estas prácticas **aceleran el desarrollo** y evitan fabricar modelos de prueba innecesarios, ahorrando materiales. También facilitan la colaboración global –varios equipos pueden reunirse en un espacio virtual compartido para pulir el diseño– lo que reduce viajes y su huella de carbono[\[39\]](#).

- **Big Data de preferencias y desempeño:** Analizando grandes bases de datos de uso de productos anteriores (por ejemplo, datos IoT de cómo los clientes usan un electrodoméstico en la vida real), los diseñadores pueden identificar qué componentes fallan más o qué funcionalidades sobran. Así, en nuevas versiones eliminan lo superfluo, simplifican para fiabilidad o incluyen materiales más duraderos. Este enfoque de **diseño centrado en datos** evita sobreingeniería y prolonga la vida útil, ya que el producto incorporará mejoras basadas en evidencias.

En conjunto, el diseño asistido por THD tiende hacia productos **modulares, reparables y optimizados**. Un ejemplo concreto es el de ciertos fabricantes de electrónica que, usando análisis de datos de reparaciones, rediseñaron sus dispositivos para que módulos (batería, pantalla) sean intercambiables fácilmente, facilitando la reparación o actualización sin desechar el aparato completo. Otro ejemplo: diseñar envases pensando en la economía circular; empresas que emplean software de simulación para crear **envases reutilizables o más ligeros** manteniendo la protección del producto, reduciendo residuos plásticos. Todas estas mejoras nacen en la mesa de diseño y son posibles gracias a las potentes herramientas digitales de hoy.

## Fabricación y producción inteligente

Durante la **fabricación**, el objetivo es producir con la máxima eficiencia, mínima generación de residuos y uso responsable de energía y materiales. Las THD transforman las plantas en **fábricas inteligentes** capaces de lograrlo:

- **IoT y sistemas ciber-físicos:** En un taller conectado, cada máquina y cada línea está sensorizada. Los datos en tiempo real de producción (velocidades, temperaturas, estado de máquinas) se integran en plataformas de monitoreo que permiten gestionar la fábrica con precisión. Si un sensor IoT detecta que se está produciendo más desecho de lo normal en una máquina (por descalibración, por ejemplo), el sistema emite alarmas para calibrarla inmediatamente, evitando seguir generando piezas defectuosas. Asimismo, mediante **control en tiempo real**, se ajustan automáticamente variables de proceso para mantenerlas en rangos óptimos –por ejemplo, regular el calor de un horno para no gastar gas de más pero tampoco comprometer la calidad del material tratado.
- **Robótica y automatización flexible:** La introducción de robots (tradicionales y colaborativos) aumenta la **precisión** y reduce la variabilidad en procesos manuales. Esto mejora el rendimiento de primera calidad (más piezas buenas a la primera, menos reprocesos y chatarra). Los cobots, al poder compartir espacio con humanos, permiten automatizar partes de la línea que antes no se podían, consiguiendo que incluso en producciones pequeñas se aplique

automatización sin perder flexibilidad. Por otro lado, robots autónomos optimizan flujos internos: los AGVs entregan componentes justo a tiempo, lo que puede evitar que los materiales esperen mucho tiempo y se deterioren o caduquen (pensemos en ingredientes alimentarios en una fábrica de alimentos, o en resinas químicas que tienen vida útil limitada una vez abiertas). La **coordinación vía 5G** de robots móviles, manipuladores y operarios garantiza que cada recurso esté en el lugar preciso en el momento necesario, reduciendo esperas y sobrealmacenamiento[\[45\]](#).

- **Sistemas MES y análisis de datos en planta:** Los sistemas de ejecución de manufactura (MES) registran cada lote, orden y operación realizada. Con Big Data e IA aplicados a estos datos históricos, se pueden encontrar ineficiencias ocultas. Por ejemplo, analizar meses de datos podría revelar que cierta máquina produce más desperdicio a ciertas horas o turnos, llevando a investigar la causa (quizás un operario necesita más formación a esa hora, o hay fluctuaciones de voltaje nocturnas que afectan la precisión). Algunas fábricas ya usan **algoritmos de optimización** que reordenan dinámicamente la secuencia de tareas para minimizar cambios de línea o aprovechar al máximo materiales disponibles. Esto reduce tiempos de setup y pérdidas de material en cada cambio de lote.
- **Fabricación aditiva en planta:** Si bien la impresión 3D no reemplazará todas las técnicas tradicionales, se está incorporando en plantas para tareas específicas. Por ejemplo, en vez de tener que mecanizar un costoso útil o molde para un proceso, se imprime en 3D bajo demanda (con plásticos biodegradables o metal en polvo reciclado) justo cuando se necesita. Esto ahorra tiempo y materiales que antes se invertían en utilajes que luego podían desecharse. También hay casos de fabricación híbrida: imprimir 3D prefabricados para luego montarlos con métodos convencionales, optimizando el uso material en la parte más compleja y usando métodos rápidos para lo simple.
- **Eficiencia energética y gestión inteligente:** En la producción, un gran gasto es la energía (electricidad, calor, aire comprimido, etc.). Aquí, IoT y Big Data juegan un rol vital: sensores de energía instalados en cada sección de la planta miden consumos en detalle. Un sistema de gestión energética, apoyado por IA, puede detectar consumos anómalos (máquina encendida en vacío, fugas de aire comprimido) y notificar al equipo de mantenimiento para corregirlo, logrando ahorros significativos de electricidad. También se pueden **desconectar automáticamente equipos en espera** y escalar arranques para evitar picos de demanda. Si la fábrica cuenta con paneles solares u otras fuentes renovables, la analítica avanzada optimiza su uso –por ejemplo, cargando

baterías o programando las tareas más intensivas energéticamente a las horas de mayor generación solar.

En conjunto, la fábrica inteligente impulsada por THD se caracteriza por producir con **cero defectos, cero desperdicios y cero tiempos muertos** (esa es la aspiración). Un ejemplo emblemático es la planta “faro” de Schneider Electric en Le Vaudreuil (Francia), reconocida por el Foro Económico Mundial, donde implementaron IoT extensivamente: redujeron un 25% los tiempos de inactividad y un 17% el consumo de energía, a la par que incrementaron la productividad, gracias a sensores y analítica en tiempo real<sup>[46][47]</sup>. Esto demuestra el gran impacto de aplicar THD en la fabricación para alcanzar objetivos de sostenibilidad sin sacrificar competitividad.

## Logística, cadena de suministro y trazabilidad sostenible

Una vez el producto fabricado sale de la planta, entramos en las etapas de **distribución, venta, uso y retorno**. Aquí también las THD tienen un impacto profundo, ya que la logística tradicional y las cadenas globales conllevan emisiones, embalajes y complejidades que se pueden optimizar:

- **Optimización de rutas y transporte (IoT + Big Data):** Las flotas de transporte equipadas con IoT (GPS, sensores de desempeño del vehículo) generan datos que, analizados con Big Data, permiten trazar rutas más eficientes, evitar kilómetros en vacío y reducir consumo de combustible. Un algoritmo de optimización puede reagrupar entregas para minimizar recorridos, o sugerir cambiar un itinerario en tiempo real ante un atasco, ahorrando horas de camión en ralentí. Empresas de paquetería han logrado ahorros millonarios de litros de diésel aplicando analítica a sus rutas (famoso es el caso de UPS, que redujo giros a la izquierda en sus rutas a partir de análisis de datos). Menos kilómetros recorridos implican menor huella de carbono en la distribución.
- **Trazabilidad y transparencia mediante blockchain e IoT:** Como ya detallamos, la **trazabilidad** completa de materiales y productos es clave para la economía circular. Tecnologías como RFID, códigos QR o sensores embebidos en palés/containers permiten seguir un ítem a lo largo de todo su viaje. Esa información se registra idealmente en blockchain u otras bases de datos compartidas, de forma que cada actor (proveedor, fabricante, transportista, minorista, reciclador) tiene **visibilidad del historial** del producto<sup>[48][49]</sup>. Esto permite asegurar, por ejemplo, que cierto lote de materia prima proviene de una fuente reciclada certificada, o que un determinado producto ha sido transportado bajo condiciones de temperatura adecuadas. Además, la información de trazabilidad ayuda a **gestionar retornos y logística inversa**: un fabricante puede saber cuántos de sus productos llegaron al fin de vida y dónde están,

facilitando recogerlos para reciclar. En modelos circulares como el **alquiler o leasing de productos**, el seguimiento digital es esencial para gestionar el inventario rotativo y garantizar que los productos vuelvan al fabricante para reacondicionamiento.

- **Cadenas de suministro más cortas y reconfigurables:** Gracias a plataformas digitales (muchas en la nube), hoy una empresa puede colaborar con proveedores locales de forma ágil. Mercados electrónicos B2B permiten encontrar materia prima reciclada disponible regionalmente, sustituyendo importaciones lejanas. También, la impresión 3D local reduce envíos internacionales de piezas. Todo esto acorta las cadenas de suministro, haciéndolas más **resilientes y con menor impacto** de transporte. Las THD facilitan esta coordinación distribuida: por ejemplo, sistemas de planificación (ERP avanzados) y marketplaces en línea avisan en tiempo real de necesidades de abastecimiento y conectan con proveedores certificados al instante.
- **Gestión inteligente de inventarios:** Sensores IoT en estanterías o contenedores pueden monitorear stock de materias y productos en almacenes. Con Big Data se puede predecir demanda futura y ajustar los niveles óptimos de inventario para evitar sobreaprovisionamiento (que inmoviliza recursos y a veces termina en desperdicio si los productos caducan o quedan obsoletos). Supermercados y minoristas están empezando a usar etiquetas inteligentes que llevan cuenta de los productos en góndola, reduciendo las roturas de stock pero también evitando pedir de más. Todo se traduce en **menos exceso** que acabe como residuo y mayor eficiencia económica.
- **Envases inteligentes y logística inversa:** Algunas empresas incorporan sensores o códigos en los envases que, al ser escaneados, facilitan la devolución para reciclaje o reuso. Por ejemplo, ciertas botellas reutilizables llevan códigos QR que los consumidores escanean para obtener recompensas al retornarlas en máquinas de depósito; el sistema digital contabiliza retornos y gestiona recolección. Incluso hay prototipos de envases con dispositivos IoT que reportan cuándo el contenido está por acabarse, para planificar reponer (útil en bienes industriales). Todo esto apoya modelos circulares de **recuperación de envases**. En cuanto al embalaje en sí, se está innovando con etiquetas RFID o **marcas de agua digitales** invisibles en plásticos que luego las máquinas de reciclaje pueden leer para clasificar correctamente los plásticos por tipo [\[49\]](#). La UE está promoviendo el **Pasaporte Digital de Producto** para ciertos bienes, que básicamente es un registro digital (en blockchain u otro sistema) con toda la info relevante del producto para reparadores, recicladores y consumidores, accesible escaneando un código.

- **Plataformas de economía colaborativa:** Si bien no son un dispositivo físico, merecen mención las plataformas digitales (apps, sitios web) que habilitan nuevos modelos logísticos sostenibles: por ejemplo, aplicaciones de **car-sharing** o movilidad compartida (disminuyendo coches privados en circulación), plataformas de **sharing** de herramientas o equipos (que extienden el uso de un mismo producto a muchos usuarios, aumentando su factor de utilización y reduciendo la necesidad de fabricar más unidades), e incluso plataformas de intercambio de residuos industriales (una empresa publica un subproducto que le sobra y otra lo adquiere como materia prima, fomentando la **simbiosis industrial**). Todas estas soluciones se basan en conectividad (apps móviles, nube, datos) para poner en contacto oferta-demanda de recursos ociosos, conformando nuevas cadenas de valor más circulares.

En resumen, la logística 4.0 apoyada en THD tiende a ser **más inteligente, transparente y colaborativa**. Un estudio de Chatham House destaca que mejorar la trazabilidad y transparencia con IoT, blockchain, cloud y 5G es tremadamente beneficioso para la economía circular: permite verificar contenido reciclado, facilitar comercio de productos remanufacturados entre países de forma legal, e informar a recicladores cómo tratar un producto para recuperarlo mejor<sup>[50][51]</sup>. Todo ello cimenta la confianza y coordinación entre los múltiples actores de una cadena de valor circular<sup>[52][49]</sup>. Sin duda, las THD están transformando las “cadenas” lineales en **“redes” circulares** más dinámicas y sostenibles.

## Uso, mantenimiento y extensión de la vida útil

Cuando el producto llega al usuario final, comienza la fase de **uso y mantenimiento**, donde también las tecnologías digitales pueden mejorar la sostenibilidad al prolongar la vida útil y optimizar el consumo:

- **Productos conectados (IoT) y mantenimiento predictivo:** Muchos bienes de consumo y equipos industriales vienen ya con sensores y conectividad incorporada. Esto permite que el fabricante o el usuario realicen un **seguimiento en tiempo real del estado** del producto durante su uso. Por ejemplo, un vehículo moderno envía datos de motor, batería, etc., y puede indicar mediante una app cuándo requiere servicio antes de que ocurra una avería grave. En aerogeneradores eólicos o maquinaria fabril, los sensores IoT permiten una estrategia de mantenimiento predictivo similar a la descrita en planta: anticipar fallos y realizar ajustes que **evitan daños mayores**, con lo cual se alarga significativamente la vida útil del activo (pasar de un mantenimiento correctivo post-fallo a uno proactivo basado en condición). Esto reduce la necesidad de

reemplazar equipos prematuramente y ahorra los recursos que conllevaría fabricar uno nuevo.

- **Actualizaciones de software y funcionalidad:** En dispositivos electrónicos, electrodomésticos, e incluso coches, la tendencia es habilitar **actualizaciones remotas de software** (OTA, *Over The Air*) para corregir errores o añadir mejoras con el tiempo. Gracias a ello, un producto puede mejorar en eficiencia o capacidades después de comprado, en lugar de quedar obsoleto. Por ejemplo, algunas compañías han actualizado remotamente la gestión de batería de coches eléctricos para darles más autonomía o prolongar la vida de la batería, sin cambiar el hardware. Esto es claramente una ganancia en sostenibilidad, ya que retrasa la necesidad de sustituir el aparato por otro más nuevo. La conectividad también posibilita modelos de *Product-as-a-Service*, donde la empresa mantiene el control del producto y garantiza que siempre esté en óptimas condiciones (cambiando piezas, actualizando software), ofreciendo al cliente la función (por ejemplo, “iluminación como servicio” en lugar de vender bombillas). Al permanecer la propiedad en el fabricante, este tiene incentivo para que dure mucho y sea recuperable, cerrando el círculo.
- **Monitorización del consumo y uso eficiente:** Muchos productos conectados permiten al usuario monitorear su propio consumo de recursos. Por ejemplo, medidores inteligentes de energía en hogares muestran patrones de uso eléctrico e incluso recomiendan cómo reducirlo; duchas inteligentes que indican en una app cuántos litros de agua se consumieron en la semana; aplicaciones vinculadas a coches que califican la eficiencia de tu conducción para ahorrar combustible. Esta retroalimentación digital fomenta comportamientos más sostenibles en el usuario final. En entornos industriales, sistemas IoT pueden monitorizar el **rendimiento energético** de cada máquina durante la fase de uso productivo, detectando si alguna está operando fuera de parámetros óptimos (gastando de más) y ajustando en tiempo real.
- **Soporte remoto y realidad aumentada:** Ante un problema con un equipo, en lugar de esperar a un técnico in situ, cada vez es más común el soporte remoto utilizando RA. El usuario puede mediante su móvil o unas gafas mostrar el equipo al centro de servicio, y este le va guiando con superposiciones de información para arreglar fallos simples sin tener que desplazar a nadie. Esto no solo ahorra tiempo, sino también evita las emisiones de transporte de técnicos por desplazamientos que quizá eran innecesarios. También minimiza el tiempo que el equipo está fuera de servicio, aumentando su disponibilidad y vida útil efectiva.

- **Comunidades y plataformas de reparación:** Gracias a Internet han surgido foros, tutoriales (YouTube, etc.) y plataformas donde usuarios intercambian conocimiento para reparar objetos ellos mismos (*do it yourself*). Incluso impresoras 3D comunitarias (en **fab labs**) donde uno puede imprimir la pieza que se rompió de su licuadora en vez de tirarla. Este movimiento de *right to repair* (derecho a reparar) se apoya en la conectividad digital para difundir manuales, compartir diseños de repuesto y conectar a personas con habilidades para arreglar productos. Aunque es un aspecto social más que tecnológico, la **digitalización facilita esa cultura de reparación y reutilización** masivamente.

Todas estas acciones durante la fase de uso se traducen en **extender la vida útil** de los bienes, lo cual es quizás la contribución más importante a la sostenibilidad (el producto más ecológico es el que no hay que fabricar de nuevo porque el existente sigue funcionando). Un aparato que dura 15 años en vez de 5 supone evitar la producción de dos unidades de reemplazo y toda la extracción de recursos asociada. Por eso la economía circular enfatiza tanto el mantenimiento y la durabilidad, y las THD son aliadas para lograrlo de forma inteligente. Un estudio mencionado por la Fundación Ellen MacArthur señala que blockchain e IoT, al proporcionar un “historial vital” detallado de un producto, ayudan a que cada usuario a lo largo de la cadena tome decisiones informadas para **reutilizar, remanufacturar o reciclar** de la mejor manera[\[53\]](#)[\[29\]](#). Por ejemplo, si en el blockchain de un equipo consta qué piezas fueron cambiadas y cuándo, un comprador de segunda mano puede saber qué esperar y un reciclador sabrá cómo desmontarlo eficientemente[\[54\]](#)[\[55\]](#).

## Reciclaje, recuperación y fin de vida

Finalmente, cuando un producto llega al final de su vida útil en su forma actual, las tecnologías digitales también intervienen para asegurar que sus componentes y materiales se reintegren al ciclo económico en lugar de acabar en desperdicio:

- **Clasificación automática de residuos:** En plantas de reciclaje modernas se emplea **visión artificial e IA** para identificar materiales en las líneas de residuos. Cámaras hiperespectrales combinadas con algoritmos pueden distinguir tipos de plástico por su espectro, o detectar objetos valiosos (como dispositivos electrónicos) entre residuos mezclados. Acopladas con brazos robóticos o sopladores de aire, estas soluciones separan con alta pureza materiales reciclables que antes se perdían. Por ejemplo, recicadoras de envases usan sistemas así para separar PET claro de PET verde, o para eliminar impropios, logrando bultos de material homogéneo que obtienen mejor valor de reutilización. Esto aumenta la **tasa de reciclaje** y la calidad del material reciclado obtenido.

- **Blockchain para cadena de reciclaje:** Como vimos en ejemplos, blockchain puede **certificar el contenido reciclado** de un producto y seguirlo hasta su reincorporación en nuevas materias primas[\[29\]](#). También está siendo usado para garantizar que los materiales recolectados (por ej. plástico oceánico, o metales de baterías) realmente se reciclan bajo condiciones responsables y no acaban desechados en otro lugar. Iniciativas usan tokens digitales para representar cierta cantidad de material recuperado; al usar ese token en la fabricación, el productor demuestra verificación del origen reciclado. Esto aporta **transparencia** al mercado de secundarios y puede incentivar económicamente el reciclaje (p. ej., vendiendo créditos de material reciclado certificado).
- **Pasaportes de materiales y diseño para reciclaje:** Con las bases de datos de composición detallada (a las que un reciclaror puede acceder escaneando el producto o consultando su registro digital), se facilita el desmontaje y procesamiento. Por ejemplo, Electrolux junto con Covestro participan en un proyecto europeo (Circular Foam) donde usan blockchain para almacenar datos sobre la espuma de poliuretano de frigoríficos y la manera recomendada de extraerla al reciclar[\[55\]](#). Así, cuando esas neveras llegan a la planta de reciclaje, disponen de información para recuperar esa espuma de la forma más efectiva, cosa que actualmente es compleja. Este tipo de iniciativas demuestran cómo los datos acompañando al producto **mejoran la reciclabilidad real**.
- **Robots de desensamblaje:** Al igual que en clasificación, se están desarrollando robots capaces de desmontar ciertos productos al fin de su vida. Un ejemplo son robots que desarmen módulos electrónicos (separando placas, pantallas, baterías) mucho más rápido que humanos y evitando exposición a riesgos. Otro es un brazo robot especializado en abrir discos duros para recuperar los imanes de neodimio en su interior (valiosos para reusar en aerogeneradores, por ejemplo). Estas soluciones, guiadas por visión e IA, aceleran la fase de **preparación para reciclar** y aseguran que se recuperen componentes críticos que manualmente sería costoso extraer.
- **Marketplace de residuos y subproductos:** Plataformas digitales ponen en contacto la oferta de residuos de empresas con demandas de materia prima secundaria. Por ejemplo, una plataforma puede tener listados de residuos plásticos, metálicos, orgánicos de diferentes calidades disponibles en distintas regiones, y empresas recicadoras o manufactureras compran esos lotes para reintroducirlos en su producción. Estas herramientas amplían el **mercado de la reciclabilidad**, evitando que materiales útiles acaben en vertedero por falta de visibilidad o conexiones. Además, usando algoritmos de coincidencia y

geolocalización, optimizan que quien esté más cerca adquiera el material, reduciendo transporte.

- **Sensores para compostaje y residuos orgánicos:** No todo es material técnico; en la parte biológica de la economía circular, también hay innovación digital. Por ejemplo, sensores de humedad y temperatura en plantas de compostaje o digestores controlados por IA logran condiciones óptimas para convertir residuos orgánicos en abono o biogás más rápidamente. En ciudades inteligentes se están colocando **sensores en contenedores de basura** para optimizar las rutas de recolección (solo pasar cuando estén llenos, ahorrando viajes inútiles) y para identificar contenedores con improprios (mediante visión al vaciar). Todo ello mejora la eficiencia de la gestión de residuos municipales, clave para incrementar tasas de reciclaje.

En definitiva, en la etapa final del ciclo de vida las THD aseguran que “**el círculo se cierra**”: que los materiales valiosos de productos al final de uso encuentren el camino de vuelta a la producción como recursos. Cuando estas tecnologías trabajan juntas –sensores IoT identificando materiales, blockchain registrando los flujos, robots separando, marketplaces conectando oferta-demanda– se tiende a un sistema donde cada residuo es *input* de otro proceso, exactamente el objetivo de la economía circular[56][51].

## Nuevos modelos de negocio sostenibles habilitados por las THD

La transformación digital y la sostenibilidad no solo modifican procesos técnicos, sino que dan pie a **nuevos modelos de negocio**. Muchas de estas innovaciones empresariales serían imposibles sin las THD que las soportan. Algunos modelos sostenibles emergentes son:

- **Product-as-a-Service (PaaS):** Consiste en vender el servicio o resultado que proporciona un producto, en lugar de vender el producto en sí. Ejemplos: iluminación como servicio (te vendo “luz” en lugar de bombillas), fotocopias como servicio (en lugar de máquinas de fotocopia), movilidad como servicio (uso de vehículo en lugar de coche propio). Las THD –particularmente IoT y conectividad– permiten al proveedor monitorear remotamente sus equipos en casa del cliente, encargarse del mantenimiento y optimizar su utilización. Este modelo incentiva al fabricante a hacer productos **ultra-duraderos y modulares**, porque sigue siendo dueño de ellos y gana dinero cuanto más tiempo duren funcionando (contrario a la obsolescencia programada). Philips, por ejemplo, ofrece iluminación como servicio en edificios: instala las luminarias LED, las mantiene con sensores IoT que detectan fallos, y el cliente paga por los “lumens”

consumidos. Al final, Philips recupera las lámparas para remanufacturar. Sin sensores, cloud y contratos digitales esto no sería viable a escala [57].

- **Economía colaborativa y plataformas de compartición:** Aplicaciones móviles y webs conectan usuarios para compartir bienes o servicios. Airbnb (alojamiento), Blablacar (viajes compartidos), plataformas de alquiler de herramientas entre particulares, etc., permiten **usar más intensivamente los recursos existentes**. Un taladro convencional se usa apenas minutos en su vida útil en un hogar; con una plataforma de alquiler P2P, ese mismo taladro puede servir a 10 personas diferentes, reduciendo la necesidad de fabricar 10 taladros separados. Las THD (apps, geolocalización, pagos digitales, reputación online) hacen posible este tipo de intercambios de confianza entre desconocidos a gran escala. Así se crean modelos más eficientes en el uso de activos.
- **Modelos de suscripción y refill:** Relacionado con PaaS, muchas empresas están optando por vender consumibles en modelos de suscripción (por ejemplo, cápsulas de detergente concentrado que se envían mensual y se usan con un envase reutilizable inteligente). Algunas marcas de limpieza y cuidado personal hacen esto: te proveen un dispensador IoT que mide tu consumo y automáticamente pide recargas cuando estás por terminar, entregándote recargas en envase reciclable. Este modelo apoyado por IoT y e-commerce reduce envases de un solo uso y fideliza al cliente en un esquema sostenible. Otro ejemplo son las **tiendas sin cajas** (Amazon Go) o las despensas inteligentes, donde los productos se identifican por RFID/visión y se cobran automáticamente –facilitado por IA e IoT– lo que hace práctico traer envases reutilizables y recargarlos, ya que todo está digitalmente controlado.
- **Simbiosis industrial 4.0:** La simbiosis industrial implica que los residuos o subproductos de una industria sirven de insumo a otra. Esto no es nuevo, pero a gran escala es complicado sin coordinación digital. Hoy existen **mapas inteligentes de residuos**: proyectos que recopilan datos de diversas industrias locales sobre sus flujos de desechos (tipo, cantidad, frecuencia) y mediante Big Data identifican posibles coincidencias (p.ej., una fábrica de zumos produce cáscaras cítricas ricas en biomaterial que una planta química cercana podría usar). Plataformas en la nube permiten a empresas publicar sus corrientes residuales de forma anónima y recibir propuestas de intercambio. Así han surgido “clusters” donde, por ejemplo, una empresa cede su exceso de calor a otra (requiere sensores para monitorizar y un control digital del flujo), o una planta de tratamiento de agua acepta el efluente de otra y extrae recursos. Las THD facilitan estas conexiones **en tiempo real y con datos fiables**, creando nuevos ecosistemas de negocio que ahorran costos y reducen desechos.

- **Agricultura inteligente y cadenas alimentarias sostenibles:** Un modelo de negocio emergente es ofrecer servicios de **agricultura de precisión**: empresas tecnológicas instalan sensores en campos, usan imágenes satelitales y aplican IA para asesorar a agricultores sobre riego exacto, fertilización óptima, etc., a cambio de un fee o parte de la mejora de cosecha. Aquí se vende conocimiento derivado de datos (Big Data/IA) como servicio, obteniendo un win-win: el agricultor produce más con menos insumos (beneficio económico y ambiental) y la empresa de tecnología gana por compartir sus algoritmos. De modo análogo, en distribución alimentaria surgen plataformas que usan IoT para monitorear alimentos y **evitar desperdicios**: por ejemplo, apps que avisan a consumidores de descuentos en productos cercanos a vencerse en supermercados locales, reduciendo merma; o marketplaces que conectan restaurantes con excedente de comida con clientes que la compran a menor precio (TooGoodToGo es un caso). Todos estos modelos precisan de la ubiquidad de smartphones, geolocalización y análisis de datos en tiempo real para casar oferta y demanda al momento.

En general, las THD abren la puerta a **modelos circulares innovadores** donde el valor ya no está en vender más unidades de producto, sino en **aprovechar al máximo cada unidad vendida**. Esto transforma las estrategias empresariales: de vender volumen a vender desempeño o resultados. El Informe de la Fundación Ellen MacArthur y el Foro Económico Mundial ha señalado que la digitalización (Big Data, IoT, blockchain) es un habilitador fundamental para escalar estos modelos circulares y hacerlos rentables, ya que provee la infraestructura para rastrear y monetizar la utilización extendida de los productos[\[53\]](#)[\[29\]](#).

## Nuevos mercados y sectores emergentes gracias a las THD

Así como cambian modelos de negocio existentes, las tecnologías habilitadoras digitales también han dado origen a **nuevos sectores económicos** que hace una década apenas existían. Muchos de ellos directamente relacionados con resolver desafíos de sostenibilidad o mejorar la calidad de vida de forma inteligente. Algunos ejemplos de mercados emergentes impulsados por THD son:

- **Ciudades inteligentes (Smart Cities):** Es un sector en crecimiento donde convergen IoT, Big Data, IA y conectividad para gestionar los servicios urbanos de manera optimizada. Empresas especializadas ofrecen soluciones integrales para alumbrado público inteligente (farolas IoT que ahorran energía), gestión de tráfico en tiempo real (reduciendo atascos y emisiones), monitoreo ambiental (redes de sensores de calidad de aire, ruido, agua) e incluso plataformas cívicas de participación ciudadana. Europa y Asia han invertido fuertemente en smart cities, generando un mercado global de tecnología urbana. Gracias a IoT, por

ejemplo, ciudades como Barcelona lograron ahorros de agua del 25% controlando riego de parques con sensores, y ciudades como Copenhagen reducen CO<sub>2</sub> ajustando los semáforos dinámicamente para fluir bicis y buses. Este sector reúne startups de sensores, empresas de software de analítica urbana y corporaciones de telecomunicaciones, creando empleos de **urbanistas de datos, analistas de movilidad, integradores IoT**, etc.

- **Salud digital y telemedicina:** La combinación de IA e IoT ha dado un salto a la salud. Hoy hablamos de *eHealth* o salud digital, un campo que abarca desde wearables que monitorean constantes vitales hasta algoritmos que ayudan a diagnosticar enfermedades a partir de imágenes médicas. Un ejemplo es la detección temprana de arritmias mediante relojes inteligentes con IA, o aplicaciones de teleconsulta que permiten a médicos y pacientes conectarse remotamente. Este sector ha crecido enormemente (acelerado por la pandemia de COVID-19) y representa tanto una mejora de acceso sanitario como un ahorro de recursos (menos desplazamientos de pacientes, mejor prevención evitando complicaciones). Los avances en **biotecnología** también convergen aquí: secuenciación genética masiva (big data biomédico) para medicina personalizada, impresión 3D de prótesis o incluso tejidos humanos. Todo esto configura nuevos mercados de servicios clínicos digitales, empresas de dispositivos médicos inteligentes y roles laborales como **analistas de datos clínicos, ingenieros biomédicos digitales, desarrolladores de IA médica**.
- **Publicidad y marketing personalizados (Big Data):** El análisis masivo de datos y la IA han revolucionado cómo las empresas llegan a los consumidores. Hoy es habitual que recibamos anuncios adaptados a nuestros intereses, recomendaciones de productos personalizadas en plataformas de e-commerce, o notificaciones contextuales en el móvil cuando pasamos cerca de cierta tienda. Este sector de *adtech* y marketing digital hipersegmentado es una creación de las THD (Big Data, algoritmos, geolocalización). Aunque su relación con sostenibilidad puede no ser obvia, tiene una arista interesante: si se hace responsablemente, la publicidad personalizada puede ayudar a promover productos sostenibles a los consumidores adecuados, y optimiza los gastos en marketing (evitando imprimir folletos masivos, por ejemplo). En cualquier caso, ha creado un gran mercado de **científicos de datos, expertos en IA de marketing, gestores de campañas digitales**, etc.
- **Finanzas digitales y trazabilidad financiera (FinTech y 5G):** Las redes 5G y blockchain han impulsado innovaciones en finanzas: pagos móviles ultrarrápidos, microseguros automatizados, criptomonedas y contratos inteligentes para financiamiento de proyectos verdes, etc. El **FinTech** incluye

apps bancarias avanzadas, plataformas de inversión colaborativa (crowdfunding) y monedas digitales de banco central en desarrollo. A nivel sostenible, están surgiendo fintech enfocadas en **finanzas verdes**, donde, por ejemplo, gracias a blockchain se asegura que los fondos de un bono verde se invierten en lo prometido, o que las compensaciones de carbono compradas corresponden a proyectos reales verificados. También existen aplicaciones que analizan tus gastos (Big Data) y te dan un “score de carbono” de tu estilo de vida, incentivando finanzas personales sostenibles. Todo este sector estaba en pañales hace 15 años y ahora es un campo laboral dinámico que requiere **desarrolladores blockchain, analistas de datos financieros, especialistas en ciberseguridad financiera**, etc.

- **Energías renovables inteligentes:** La transición energética hacia fuentes renovables (solar, eólica, almacenamiento en baterías) depende en gran medida de sistemas digitales para gestionarla. El concepto de **smart grids** o redes eléctricas inteligentes es un mercado en sí: sensores en la red, contadores inteligentes en casas, algoritmos que balancean oferta/demanda en tiempo real, plataformas de intercambio energético P2P (uno puede venderle excedente solar a su vecino mediante blockchain). Asimismo, la optimización de parques eólicos y solares utiliza gemelos digitales e IA para predecir producción, mantener equipos (parques eólicos offshore con turbinas conectadas enviando datos a tierra para mantenimiento predictivo) y combinar fuentes con almacenamiento. Empresas especializadas en software energético y control están en auge, al igual que perfiles de **ingeniero de datos en energía, operador de redes inteligentes, desarrollador de software de control**. La electrificación masiva (vehículos eléctricos, bombas de calor) también necesita digitalización para gestionarse sin colapsos, abriendo otro frente de mercado en torno a cargadores inteligentes, apps de gestión de carga, etc.
- **Biotecnología industrial y bioeconomía digital:** La **biotecnología** se considera una THD emergente por su potencial transformador. Hablamos de utilizar organismos o procesos biológicos para producir de forma sostenible: por ejemplo, cultivar microalgas que consumen CO<sub>2</sub> y generan bioplásticos, o bacterias que digieren residuos para producir bioenergía. Aquí la digitalización aporta herramientas como **bioinformática** (análisis de datos genéticos con Big Data e IA para diseñar microorganismos optimizados) y automatización de laboratorios (*lab-on-a-chip*, robots de experimentación). La convergencia entre biología y tecnología digital está dando lugar a startups de biotecnología que aplican aprendizaje automático para descubrir enzimas que reemplacen procesos químicos contaminantes, o imprimir en 3D tejidos orgánicos. Esta **bioeconomía digital** genera roles híbridos (biólogos computacionales, ingenieros

bioinformáticos) y promete industrias nuevas como producción de alimentos alternativos (ej. proteínas vegetales fermentadas estilo “carne” cultivada) o moda sostenible (fabricación de cuero vegano a partir de micelio, con control IoT del cultivo). Aunque incipiente, es un sector de gran crecimiento donde Europa invierte para obtener materiales y productos con menor huella ecológica combinando **ciencia de la vida + datos**.

En todos estos ejemplos vemos cómo las THD impulsan tanto la transformación de sectores tradicionales (ciudades, industria, energía, finanzas) como el surgimiento de **sectores enteramente nuevos**. Esta dinámica crea **nuevos perfiles profesionales y puestos de trabajo** acordes a la era digital y verde: desarrolladores de aplicaciones móviles, expertos en Big Data, científicos de datos ambientales, especialistas en blockchain, ingenieros de robótica, consultores de transformación sostenible, etc. De hecho, muchas de las ocupaciones emergentes en las últimas clasificaciones de empleos del futuro están relacionadas con estas tecnologías (como ingeniero de IA, especialista en IoT, analista de ciberseguridad) y alineadas con las necesidades de una economía más sostenible. La Unión Europea y otros organismos fomentan la formación en competencias digitales y verdes para cubrir la demanda de estos **nuevos perfiles profesionales** que combinan conocimientos tecnológicos con conciencia ambiental[\[11\]](#).

## Conclusiones

En este capítulo hemos explorado el papel esencial que juegan las **Tecnologías Habilitadoras Digitales (THD)** en la transición hacia una economía sostenible y circular. Hemos visto que conceptos como IoT, Big Data, IA, gemelos digitales, blockchain, robótica colaborativa, entre otros, no son solo tendencias tecnológicas de moda, sino **herramientas concretas** que permiten reimaginar los procesos productivos y los modelos de negocio bajo criterios de eficiencia, circularidad y menor impacto ambiental. Gracias a estas tecnologías, es posible diseñar productos más duraderos y ecológicos, fabricar con menos residuos, gestionar cadenas de suministro transparentes y responsables, extender la vida útil de los bienes mediante mantenimiento inteligente, y recuperar materiales al final de su uso de forma efectiva.

La **evolución desde la economía lineal a la circular** se ve enormemente potenciada por la digitalización: los “bucles” de reutilización y reciclaje se cierran mejor cuando disponemos de información en tiempo real, trazabilidad fiable y automatización que facilita las operaciones circulares[\[56\]](#)[\[53\]](#). Al mismo tiempo, la integración de THD está dando lugar a **innovaciones empresariales** que priorizan el acceso sobre la propiedad, el servicio sobre el producto, y la colaboración sobre la competencia aislada, abriendo camino a nuevos mercados y profesiones.

Para los estudiantes de Desarrollo de Aplicaciones Multiplataforma (DAM) y otros campos tecnológicos, comprender estas sinergias entre digitalización y sostenibilidad resulta fundamental. No solo amplía su perspectiva sobre el **impacto positivo** que la tecnología puede (y debe) tener en la sociedad y el planeta, sino que además les prepara para formar parte de esa próxima generación de profesionales capaces de desarrollar soluciones inteligentes a los retos ambientales. Las habilidades en IoT, analítica de datos, IA, blockchain, etc., aplicadas con una visión de desarrollo sostenible, serán cada vez más demandadas conforme empresas e instituciones avancen en cumplir objetivos climáticos y de economía circular.

En conclusión, las Tecnologías Habilitadoras Digitales actúan como un **motor de cambio transversal**: hacen posible un futuro donde el crecimiento económico esté desacoplado del agotamiento de recursos, donde los productos tengan ciclos de vida cerrados, y donde la innovación tecnológica y la responsabilidad ambiental vayan de la mano. Prepararnos técnicamente e intelectualmente para ese futuro es el desafío y la oportunidad que tenemos ante nosotros. Como profesionales de la era digital, estamos llamados a **liderar con conocimiento y creatividad** la construcción de un sistema productivo más sostenible, apoyándonos en las potentes herramientas tecnológicas que hoy tenemos a disposición.

### Referencias utilizadas:

- Santander (2023). *Economía lineal y economía circular: diferencias clave*. Explicación de ambos modelos[\[3\]](#)[\[8\]](#)[\[58\]](#).
- CEUPE (2021). *¿Qué son las Tecnologías Habilitadoras Digitales?*. Definición de THD y ejemplos (IoT, Big Data, IA, etc.)[\[13\]](#)[\[16\]](#)[\[59\]](#).
- Eniun (2025). *Tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0*. Descripción actualizada de IoT[\[14\]](#), gemelos digitales[\[21\]](#), fabricación aditiva[\[36\]](#), robótica colaborativa[\[31\]](#), Big Data/IA[\[60\]](#), 5G[\[45\]](#), blockchain para trazabilidad[\[61\]](#), etc.
- Chatham House – circulareconomy.earth (2023). *Supply chain traceability for a circular economy*. Importancia de IoT, blockchain, cloud y 5G en trazabilidad circular[\[49\]](#)[\[25\]](#).
- Ellen MacArthur Foundation (2022). *Blockchain & circular economy*. Casos: Coca-Cola y Circularise usando blockchain para reciclaje[\[29\]](#) y cómo DLT ayuda a recirculación de materiales[\[53\]](#).
- Covestro (2021). *Digital traceability of plastics via blockchain*. Caso de uso con Porsche: blockchain + gemelo digital para trazar plásticos y huella de CO<sub>2</sub> en automoción[\[27\]](#).
- Wikipedia (2023). *Economía circular*. Definición del concepto y principios 3R[\[8\]](#); origen histórico[\[6\]](#).

---

[1] [2] [13] [16] [17] [40] [59] Tecnologías Habilitadoras Digitales: Qué son y cuáles son

<https://www.ceupe.com/blog/tecnologias-habilitadoras-digitales-que-son-y-cuales-son.html>

[3] [4] [5] [8] [9] [11] [57] [58] Economía lineal y circular: ¿a qué se refieren cada uno de estos términos y cuáles son sus diferencias?

<https://www.santander.com/es/stories/economia-lineal-y-circular-a-que-se-refieren-cada-uno-de-estos-terminos-y-cuales-son-sus-diferencias>

[6] [7] Economía circular - Wikipedia, la enciclopedia libre

[https://es.wikipedia.org/wiki/Econom%C3%ADa\\_circular](https://es.wikipedia.org/wiki/Econom%C3%ADa_circular)

[10] [29] [53] [54] [55] Blockchain can facilitate the circular economy transition | Ellen MacArthur Foundation

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/tech-enablers-series/part-2>

[12] File:Produktionsketten.png - Wikimedia Commons

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Produktionsketten.png>

[14] [15] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [26] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [60] [61] Tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 - Eniun

<https://www.eniun.com/tecnologias-habilitadoras-industria-4-0/>

[24] End-of-life decision support to enable circular economy in the ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123006091>

[25] [30] [48] [49] [50] [51] [52] [56] Supply chain traceability and transparency for a global circular economy | circulareconomy.earth | Chatham House

<https://circulareconomy.earth/publications/supply-chain-traceability-and-transparency-for-a-global-circular-economy>

[27] [28] Blockchain traceability for plastics in cars | Covestro | Covestro

<https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2021/enabling-blockchain-traceability-auto-value-chain>