



POSITION PAPER

¿QUÉ ES LA **ECONOMÍA CIRCULAR?**

MARZO DE 2022

Ametic
LA VOZ DE LA INDUSTRIA DIGITAL

¿Qué es la economía circular?

En 2016, la Agencia Europea de Medio Ambiente definió que el concepto de economía circular *puede aplicarse a todo tipo de recursos naturales, incluyendo materiales bióticos y abióticos, energía, agua y suelos. Elementos como el ecodiseño, reparación, reutilización, restauración, remanufactura, compartición de productos, prevención y reciclado de residuos son importantes en el concepto de economía circular.*

El modelo de economía circular distingue entre ciclos biológicos y técnicos (Figura 1). Los primeros reintroducen los alimentos y materiales biológicos (por ejemplo, algodón y madera) en el sistema mediante procesos como el compostaje o la digestión anaerobia. Estos ciclos biológicos regeneran los sistemas vivos como el suelo, de modo que proporcionan recursos renovables a la economía. Por otro lado, los ciclos técnicos recuperan y reparan productos, componentes y materiales mediante estrategias como el intercambio, la reutilización, la reparación, la remanufactura o el reciclado.

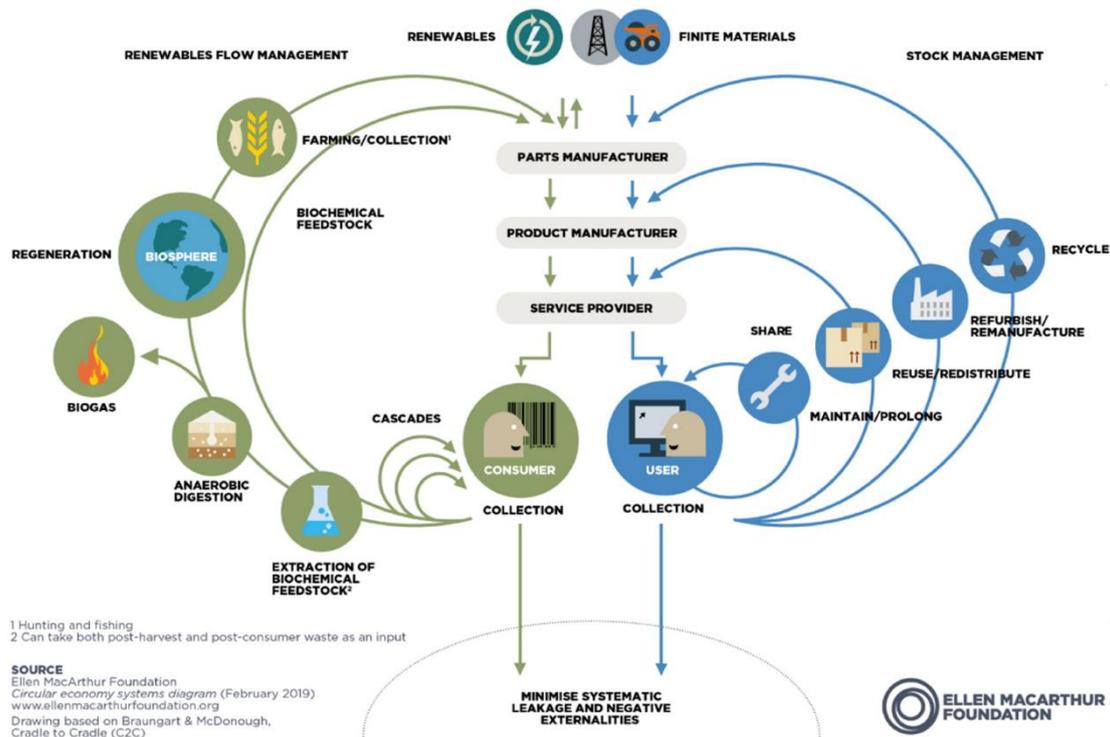


Figura 1 Diagrama del sistema de economía circular (Fuente: Ellen MacArthur Foundation).

Se han aplicado múltiples metodologías para evaluar el impacto de la economía circular. Una de las más extendidas es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de productos, componentes y materiales, que permite entender el modo de reducir y/o evitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y asegurar el uso de materias renovables. Sus tres objetivos básicos relacionados con la economía circular para esta metodología son la reducción del impacto medioambiental mediante una reducción de las emisiones de GEI; el alargamiento de la vida útil de los productos y servicios; y la mejora de los consumos energéticos del proceso mediante la eficiencia de consumo o energías renovables.

Relación de la economía circular con la Industria 4.0

Hasta ahora, el papel principal de la tecnología en los procesos productivos se ha centrado principalmente en mejorar la eficiencia de dichos procesos lineales basados en una aproximación "tomar-fabricar-desechar" gracias a un incremento en los ratios entre las unidades de entrada y salida. Los principales problemas de esta economía lineal son la escasez de recursos y el daño realizado al ecosistema por el vertido de residuos y emisiones.

La economía circular supone un cambio desde esta aproximación lineal hacia un sistema de ciclos cerrados, en los que los recursos se reciclan de forma constante en toda la cadena de valor, tal y como se refleja en la estrategia *European Green Deal*¹ de la Comisión Europea. De esta forma, dichos recursos se introducen de nuevo en la cadena de producción minimizando la necesidad de nuevos recursos y el impacto en el medio ambiente. La adopción de ciclos cerrados circulares no es simplemente una opción sino una necesidad urgente dado el incremento exponencial de la demanda y de los precios de recursos naturales, minerales estratégicos y energía. Así lo señala Gartner, que afirma que la economía circular reemplazará a la economía lineal para el año 2029.

En la actualidad, la integración entre la economía circular y la Industria 4.0 se está convirtiendo en una realidad, ya que estudios recientes han demostrado que las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 tienen el potencial de fijar las bases para el desarrollo de los principios de la economía circular en aspectos relacionados con la eficiencia de los procesos, la mejora de la eficiencia en las fuentes de energía, la reducción en la generación de residuos, la minimización de los impactos medioambientales o el desarrollo de procesos de producción más limpios.

Algunas de estas tecnologías incluyen los sistemas ciberfísicos que monitorizan y controlan la respuesta de los procesos en diferentes escenarios; las plataformas IIoT que permiten sistemas de producción flexibles que optimicen la disponibilidad y consumo de recursos; Big Data y analíticas para la toma de decisiones para conseguir un correcto funcionamiento del sistema; la fabricación aditiva y la simulación. Por ejemplo, las máquinas inteligentes y conectadas permiten un mantenimiento predictivo para prolongar su vida útil o la reparación se simplifica mediante la impresión 3D de las piezas dañadas.

Aplicaciones de tecnologías representativas de Industria 4.0

Esta sección presenta diferentes casos de uso relacionados con la aplicación de diferentes tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 para fomentar el desarrollo de la economía circular.

Gemelo digital

La utilización de los gemelos digitales es cada vez más importante y se están convirtiendo en un elemento clave en la transición hacia la economía circular. Dado que no existe una definición común para el concepto, este informe definirá un gemelo digital de un producto o proceso como una réplica digital de dicho producto o proceso, que proporciona los elementos y dinámicas de su operación durante todo su ciclo de vida (desde el diseño hasta el fin del ciclo).

□ Gemelo digital de un producto

La utilización del gemelo digital de un producto permitirá abordar los siguientes aspectos relacionados con la economía circular:

- Mejoras en el diseño y fabricación de un producto. La información recopilada durante el ciclo de vida del producto se puede utilizar para desarrollar nuevos productos que incluyan mejoras en su diseño. Por ejemplo, se podrán definir los requerimientos de diseño relacionados con su durabilidad, circularidad y uso por parte del consumidor. En la fase de producción, el gemelo digital puede agilizar el procesamiento de pedidos personalizados y la automatización de los procesos.
- Reducción del uso incorrecto y por tanto, reducción de la vida útil del producto, o pérdida de recursos. Los datos recogidos durante el uso y operación de los productos permitirán optimizar su funcionamiento y detectar usos incorrectos por parte de los usuarios. Igualmente, se podrá informar al usuario sobre la necesidad de

¹ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/45cc30f6-cd57-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-170854112>

mantenimiento y/o reparaciones que contribuyan a alargar la usabilidad del producto a partir de los datos recogidos por el gemelo digital.

- Simulación del envejecimiento del producto. La utilización del gemelo digital permite el análisis precoz del impacto del producto resultante (emisiones GEI) facilitando la optimización del diseño para la separación de los ciclos biológico y técnico.

□ Gemelo digital de un proceso

Los gemelos digitales son también una herramienta importante a la hora de determinar las configuraciones de producción que optimizan la generación de residuos y mejoran la sostenibilidad. Por ejemplo, un gemelo digital permite determinar los parámetros de control de procesos que eviten los defectos del producto, mejoren la eficiencia de recursos utilizados y reduzcan los residuos generados. Igualmente, el gemelo digital se puede utilizar para testear y validar periodos de mantenimiento alternativos para uno o más recursos productivos, lo que permite prevenir paradas no planificadas, evitar fallos en las máquinas y reducir las emisiones de CO₂.

Internet de las Cosas (IoT)

Las empresas han utilizado sensores y dispositivos como parte de sus proyectos de IoT para mejorar ineficiencias, detectar y prevenir fallos antes de que ocurran, y mantener los productos de forma remota. La monitorización remota se ha convertido en una norma, de modo que los fabricantes intentan ahora extender este concepto para mejorar la experiencia del usuario y conseguir una afiliación con la marca.

- Utilización de recursos durante la fabricación. Las soluciones de IoT se utilizan en entornos industriales para obtener datos en tiempo real sobre parámetros críticos como la temperatura, presión y eficiencia, de modo que los fabricantes puedan optimizar los procesos y detectar variaciones que puedan causar pérdidas significativas. La monitorización en tiempo real también permite evaluar el comportamiento del equipamiento y desarrollar estrategias proactivas de mantenimiento que alarguen la vida útil de las máquinas y reduzcan el riesgo de rotura.
- Extensión de la vida útil de un producto. El seguimiento del funcionamiento de los productos permitirá detectar puntos de estrés y rotura, de modo que los propios productos puedan planificar su mantenimiento para alargar su vida útil. Igualmente, se podrán identificar y localizar productos que necesitan reparación, la monitorización y generación de alertas sobre el estado de los productos en tiempo real y de forma continua.
- Control de falsificaciones. La utilización de las tecnologías de IoT permitirá una trazabilidad del origen de los materiales para garantizar sus credenciales sostenibles y reducir el impacto de los componentes falsificados. Adicionalmente, se permitirá el seguimiento de la forma de diseño y fabricación siguiendo los objetivos de sostenibilidad, incluyendo la utilización de materiales más sostenibles y reutilizables así como el proceso de fabricación.

Inteligencia Artificial (IA)

Las tecnologías de IA permitirán tres oportunidades de alto impacto relacionadas con la economía circular.

□ Diseño de productos, componentes y materiales circulares

La circularidad requiere tener en cuenta un mayor número de elementos para el diseño de productos, componentes y materiales, como el desmontaje, la capacidad de actualización o el reciclado del contenido. Estas opciones se incrementan si se tienen en cuenta la gran diversidad de materiales y las posibilidades de manipulación de estructuras con la impresión 3D. En este contexto, la IA puede ser una herramienta que permita a los diseñadores gestionar esta complejidad durante la toma de decisiones. Un proceso iterativo en el que los diseñadores

testean y refinan las sugerencias de diseño propuestas por los algoritmos de IA puede dar lugar a un mejor resultado en un periodo de tiempo más corto.

Igualmente, el diseño de nuevos materiales puede ayudar en la sustitución de químicos y materiales peligrosos. Para diseñar un nuevo material, es necesario evaluar un gran volumen de datos sobre la estructura y propiedades de los materiales, que la IA puede analizar de forma rápida para sugerir nuevos materiales. Adicionalmente, si se dispone de datos de entrenamiento adecuados, los algoritmos de IA podrán utilizarse para predecir la toxicidad de químicos o materiales de forma eficiente. El mayor reto en este caso será disponer de datos suficientes sobre las características de los materiales, ya que muchos de estos datos son propietarios e inaccesibles actualmente.

□ Optimización de la infraestructura para garantizar los flujos circulares de productos y materiales

Un reto común para generar valor de los flujos de materiales utilizados es que dichos flujos son heterogéneos en materiales, productos y subproductos, tanto biológicos como técnicos, mientras que la recuperación eficiente de materiales valorizables requiere flujos homogéneos con calidad homogénea. En general, cuanto mejor se separen los materiales, mayor será el nivel de recuperación, se podrá identificar un mayor número de componentes para reutilización y remanufactura, y se obtendrán materiales reciclados de mayor valor con una trazabilidad contrastada. En este sentido, la IA ha demostrado sus capacidades de separación de componentes en flujos continuos mediante la aplicación de técnicas de reconocimiento basadas en imagen.

□ Puesta en marcha de modelos de negocio circulares

El desarrollo de modelos de negocio circulares exitosos y sostenibles requiere la organización de las actividades de negocio (marketing, ventas, servicios post-venta, logística, apoyo al cliente) bajo los principios de la economía circular. Así, se deberán introducir nuevas propuestas de negocio como la compartición de recursos y el concepto de Product-As-A-Service. Los algoritmos de Dynamic Pricing permiten compartir y acceder a nuevos modelos como los coches o las bicicletas.

La puesta en marcha de procesos de logística inversa y remanufactura requiere resolver problemas como la fluctuación entre la demanda y la oferta de productos y componentes utilizados, y el diferente estado de los componentes retornados. Las empresas deberán elegir el ciclo siguiente de uso de cada componente retornado como la reutilización, la recuperación de componentes para su remanufactura o el reciclado, teniendo en cuenta diferentes factores como la condición del producto o la situación del mercado. En este sentido, los modelos analíticos basados en algoritmos de IA pueden recopilar grandes volúmenes de datos sobre el producto y la demanda para ayudar la empresa en sus procesos de toma de decisiones.

Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es uno de los elementos clave en la transición hacia una economía circular debido a su alta eficiencia, ya que su implementación eficaz puede producir productos con menos material y mejor funcionamiento que sus equivalentes tradicionales.

□ Materiales

Uno de los principales retos relacionados con la implementación de la fabricación aditiva es la existencia de materiales adecuados. Este cambio también lleva consigo un cambio en la utilización de nuevos materiales que pueden ser sencillos de imprimir, pero difíciles de usar en procesos de fabricación convencionales. En relación a los materiales, cada vez un mayor número de proveedores están ofreciendo materiales de impresión a partir de fuentes recicladas y biopolímeros a partir de plantas renovables.

□ Diseño

La fabricación aditiva expande el concepto de diseño, ya que tiene en cuenta el material, los parámetros de fabricación, la orientación de las piezas, las estructuras de soporte y todo tipo de postprocesado de los modelos 3D. Aunque este proceso sea más complejo, nuevas herramientas de software para la optimización de la topología, el diseño generativo y la simulación ayudan en la producción de mejores diseños.

□ Fabricación

La fabricación tradicional que utiliza moldes o herramientas suele tener lugar en una localización centralizada. La inversión realizada en esta infraestructura implica que la producción se realiza siempre en esta localización, los productos se almacenan hasta que se solicitan y se envían a los consumidores. Este modelo siempre lleva a la generación de residuos, ya que los fabricantes deben predecir sus necesidades y hacer un inventario, que a veces origina roturas o excesos de stock. En el caso de la fabricación aditiva, la producción se ajusta a la cantidad requerida, reduciendo el inventario y los residuos. Además, estas piezas pueden producirse en localizaciones cercanas al cliente, de modo que se reduzca igualmente el transporte de bienes y por lo tanto, las emisiones relacionadas.

Robótica

La robótica es también una tecnología representativa en la economía circular, especialmente en combinación con la automatización y las analíticas. Dado que los robots permiten reducir los errores humanos que pueden dar lugar a un producto o pieza defectuoso, esta tecnología permitirá garantizar la durabilidad de los productos a largo plazo y mejorará su riesgo de rechazo. Igualmente, como ya se ha comentado previamente, la robótica en combinación con los sistemas de visión artificial permite automatizar la separación de componentes para su reutilización, remanufactura o reciclaje.

Retos

Para abordar las nuevas oportunidades que presentan las tecnologías relacionadas con el concepto de Industria 4.0 con la economía circular, se han detectado los siguientes retos.

□ Disponibilidad de datos

En la actualidad, las empresas no disponen de las capacidades adecuadas de recogida de datos. Tecnológicamente, esto hace referencia a todo tipo de sensores en los procesos de producción y el uso de productos y materiales, así como las posibilidades de intercambio de datos entre las propias máquinas productivas. Algunos datos necesarios para la implementación de estrategias de economía circular se generan por las propias máquinas durante su funcionamiento, aunque dichos datos no suelen estar accesibles o en el formato adecuado para ser analizados o compartidos con otros agentes de la cadena de valor.

□ Estándares y formatos de datos comunes

La implementación de la economía circular requiere un trabajo conjunto entre los dos agentes de un ecosistema. Para conseguir que los datos intercambiados entre las entidades que conforman el ecosistema sea posible, es obligatorio disponer de formatos estándares para los datos e interfaces.

□ Número limitado de aplicaciones reales

Se han realizado numerosos estudios sobre la aplicación de las tecnologías de Industria 4.0 para lograr una economía circular, aunque la conexión entre la teoría y la práctica es todavía limitada.

□ Cambio en la cultura de las empresas

Uno de los principales cambios necesarios en las empresas está relacionado con factores culturales, ya que las empresas deben estar dispuestas a crear y compartir datos en toda la cadena de valor como un habilitador para la economía circular. Para poder reducir los impactos negativos en el medio ambiente, es necesaria una recopilación, uso y transferencia de grandes cantidades de datos, no únicamente relacionados con las emisiones, sino con todos los aspectos necesarios para conseguir tasas elevadas de reciclaje, mantenimiento predictivo y otros elementos de la economía circular. Por ello, es fundamental esa disposición a la compartición de datos en todo el ecosistema, superando las barreras culturales actuales.

Situación en España

La Estrategia española de economía circular *España Circular 2030*² publicada en el año 2018 sienta las bases para impulsar un nuevo modelo de producción y consumo, en el que el valor de productos, materiales y recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, se minimice la generación de residuos y se aprovechen los residuos que no se puedan evitar. Aunque esta estrategia tiene un carácter transversal, se han elegido algunos sectores económicos entre los que menciona a la Industria como un sector prioritario de actuación.

Tal y como recoge la estrategia, la cuarta revolución industrial basada en un nuevo nivel de organización y control de toda la cadena de valor a través del ciclo de vida de los productos y sistemas de producción mediante la utilización de la tecnología, requiere un cambio en el funcionamiento de los procesos de las empresas industriales. Es preciso acometer un proceso de transformación digital con el objetivo de satisfacer las demandas de una sociedad altamente tecnológica, cada vez más exigente, cuya satisfacción plantea que la industria tiene que hacer las cosas de otra forma, haciendo frente a retos como el diseño colaborativo, la flexibilidad y la eficiencia en la fabricación, la reducción de series y tiempos de producción, la creación de modelos logísticos inteligentes, la transformación de canales, la predicción de las necesidades del cliente, la trazabilidad multidimensional, la creación de ecosistemas industriales de valor, la sostenibilidad y la personalización del producto.

La tecnología digital supone un salto exponencial en la capacidad de los medios productivos, ya que aumenta la flexibilidad del proceso productivo y la eficiencia en el uso de recursos. El reto es combinar la flexibilidad y la eficiencia, conceptos contrapuestos hasta la actualidad. Potenciar la Industria 4.0 es una forma efectiva de impulsar la economía circular y el aprovechamiento de recursos, al conseguir un mayor control y monitorización de los mismos.

Como seguimiento de esta estrategia, el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico ha desarrollado un Catálogo de Buenas Prácticas en Economía Circular durante los años 2020³ y 2021⁴, donde se identifican buenas prácticas realizadas en España, que puedan ser escalables a otros agentes. En dichos catálogos, existe un número limitado de ejemplos en los que se mencionen las tecnologías de Industria 4.0 como elemento catalizador de la buena práctica, como la sensorización de la maquinaria de construcción para conocer su funcionamiento en tiempo real y realizar mantenimientos preventivos más eficientes para incrementar la vida útil de las máquinas, o la aplicación de tecnologías de IA y robótica a la clasificación de residuos urbanos mediante robots selección en la planta de tratamiento integral de residuos municipales urbanos para conseguir un mayor rendimiento en la selección y clasificación de los residuos, y

² https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf

³ https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/fichas-bpec-i-web_def_tcm30-525010.pdf

⁴ https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/iicbpec_tcm30-534185.pdf

una mejora en la seguridad y salud de los trabajadores, ya que la automatización minimiza la accidentalidad del personal.

Además, y aunque no aparecen recogidos en estos catálogos, se pueden mencionar otros ejemplos de aplicación de las tecnologías de Industria 4.0 en la economía circular, como el uso de etiquetas RFID inteligentes integradas dentro del propio hilo en el sector textil como sistema de IoT que identifique el ciclo de vida de la prenda o la utilización de sistemas IoT y Big Data para aumentar la eficiencia de la producción agrícola y ganadera.

Recientemente, se ha publicado la estrategia España 2050⁵, cuyo objetivo 25 aborda claramente el fortalecimiento del papel de la fiscalidad ambiental, buscando asegurar que se completa la descarbonización y se impulsa de forma decidida la economía circular y la protección medioambiental.

⁵ https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/200521-Estrategia_Espana_2050.pdf