



*Las opiniones y los contenidos de los trabajos publicados son responsabilidad de los autores, por tanto, no necesariamente coinciden con los de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad.*



Esta obra por la Red Internacional de Investigadores en Competitividad se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported. Basada en una obra en riico.net.

## **Innovar para la sustentabilidad: economía circular en el transporte aéreo**

*Romina Castillo-Malagón<sup>1</sup>*

*Ruth Selene Romero-Saldaña\**

*María Angélica Cruz-Reyes<sup>2</sup>*

### **Resumen**

El transporte aéreo es el segundo modo de transportación que más contaminantes emite, por tal motivo, empresas, organizaciones, estados y la comunidad internacional han unido esfuerzos para migrar hacia un transporte aéreo sustentable en 2050 por lo que, se observa como una alternativa viable implementar los principios de la economía circular en la fabricación de aeronaves y operación de aeropuertos. El objetivo de la presente investigación es identificar las innovaciones, desarrollos tecnológicos y mejores prácticas para migrar hacia una economía circular en el transporte aéreo.

La investigación fue de tipo descriptivo, posteriormente se pensó en el modelo de Domone et al. (2021) el cual en un proceso de ida y vuelta inicia con la necesidad de materias primas y en el proceso hacia la economía circular considera como fin último el reciclamiento, la innovación es fundamental para la industria aeroespacial, así como para la estrategia hacia la sustentabilidad.

**Palabras clave:** innovación, sustentabilidad, transporte aéreo, economía circular

### **Abstract**

Air transport is the second most polluting mode of transportation, therefore, companies, organizations, states, and the international community have joined efforts to migrate towards a sustainable air transport in 2050, and therefore, it is seen as a viable alternative to implement the principles of the circular economy in the manufacture of aircraft and operation of airports. The objective of this research is to identify innovations, technological developments, and best practices to migrate towards a circular economy in air transportation.

The research was descriptive, then the model of Domone et al. (2021) was considered, which in a round-trip process starts with the need for raw materials and in the process towards the circular economy considers recycling as the final goal, innovation is fundamental for the aerospace industry, as well as for the strategy towards sustainability.

**Keywords:** innovation, sustainability, air transportation, circular economy

---

<sup>1</sup> \*\*Facultad de Contaduría y Administración-Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, ESCA Tepepan.

## Introducción

Con la adopción de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), gran parte del mundo se ha comprometido a unir esfuerzos para mejorar la calidad de vida de la población y a la vez, reducir el impacto que las actividades humanas tienen en la naturaleza. Dichos objetivos contemplan acciones para garantizar el acceso a la salud, la seguridad alimentaria, acabar con la pobreza, brindar una educación de calidad, reducir las desigualdades y proporcionar un trabajo decente, entre otras.

En la Agenda 2030, el transporte se integra de forma transversal con otros objetivos, en especial con aquellos relacionados con la seguridad alimentaria, la salud, energía e infraestructura por citar algunos. Además, se considera un aspecto importante para el logro de los ODS ya que una cuarta de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía proceden del transporte y se prevé que estas aumenten de forma sustancial en los próximos años.

En 2019, el sector del transporte a nivel mundial fue la cuarta mayor en cuanto a la emisión de gases efecto invernadero (GEI), después del de energía, industria y agricultura; lo que representó el 15% de GEI, aproximadamente el 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron relacionadas con la energía, además, es el mayor consumido de energía del 40% de los países del mundo.

Los GEI son generados principalmente por el transporte terrestre y en segundo lugar por el transporte aéreo (de pasajeros y de carga); este último, a pesar de representar un pequeño porcentaje del valor agregado de los países miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (0.03% aproximadamente) (Jaramillo et al., 2022) es una parte importante de la economía mundial por sus fuertes vínculos interindustriales con los sectores anteriores y posteriores a la producción de aeronaves.

Contextualizando, cabe señalar que en la industria aérea o aeronáutica se consideran actividades relacionadas con la operación de aeropuertos, servicios de mantenimiento, reparación y operaciones, fabricación de aeronaves, servicios de alquiler y arrendamiento financiero, producción de petróleo refinado (incluida la mezcla de biocombustibles) entre otras; por lo que requiere de tecnologías de última generación, de constantes innovaciones y mano de obra calificada para garantizar la seguridad de usuarios y prestadores de servicios.

De manera individual, cada una de las actividades desarrolladas en la industria aeronáutica, produce desechos y contribuye a la generación de CO<sub>2</sub>, el 97% de los contaminantes se generan durante los vuelos, el 2% en la operación en tierra y el 1% en la producción de aeronaves (Domone et al. 2021).

En este sentido, las partes interesadas como líderes de las distintas economías del mundo, líneas aéreas, fabricantes de aeronaves, operadores de aeropuertos y los organismos internacionales que los regulan, han unido esfuerzos para disminuir el impacto que la aviación tiene en el medio ambiente, el resultado al respecto son iniciativas y políticas para el uso de nuevas tecnologías para producir aeronaves que generen menos ruido, operen con combustibles

menos contaminantes, utilizar nuevos materiales, implementar nuevas prácticas en los aeropuertos y modificar la infraestructura existente.

Sin embargo, lo anterior no es suficiente, ya que aunque existe el compromiso para disminuir los efectos negativos de la aviación, ya que se hallan los problemas geopolíticos que enfrenta el mundo, la guerra entre Rusia y Ucrania, así como las tensiones comerciales entre China y Estados Unidos de América (EUA), han tenido impacto en la obtención de materias primas y componentes clave para la fabricación de motores y el ensamble de aeronaves, por ello, la propuesta de migrar hacia una economía circular ha sido considerada como una alternativa para cumplir tanto con los ODS como con las demandas del mercado.

El presente trabajo tiene un alcance descriptivo y su objetivo es identificar las innovaciones, desarrollos tecnológicos y mejores prácticas para migrar hacia una economía circular en el transporte aéreo. A través de la revisión de fuentes secundarias se identifican las tecnologías y acciones implementadas en el transporte aéreo.

La ponencia se estructura de la siguiente manera, primero se presenta como marco teórico el enfoque de economía circular, después cómo ésta se relaciona con el transporte aéreo y la innovación. En otro apartado se presentan las tecnologías identificadas como viables para contribuir al cambio de modelo económico y las prácticas que algunos aeropuertos han implementados. Finalmente se presentan las conclusiones que incluye algunas reflexiones y retos.

### **Economía circular**

La economía circular tuvo su génesis con la idea de disminuir los recursos e insumos utilizados en la producción industria, proponiendo una alternativa a la economía lineal (extraer – producir – disponer) modelo de producción que se ha utilizado hasta el día de hoy (Hungaro et al. 2021). Se planteó migrar hacia una economía circular con el objetivo de minimizar los residuos y la contaminación, aprovechando al máximo los recursos y manteniendo los productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, recuperando y regenerando los productos y materiales al final de cada vida útil (MacArthur et al. 2013).

Este concepto a pesar que se empezó a utilizar desde los años de 1970, ha tenido un mayor auge y relevancia en los últimos años, al asociarse a la idea de sustentabilidad; la economía circular se basa en: diseño de productos manufacturados con valor agregado y máximo uso en ciclos de vida más largos; creación de productos versátiles con diferentes usos, en diferentes períodos de su vida útil, se procura garantizar la reutilización de un mismo bien; la restitución de los residuos sólidos al sector industrial de manera ordenada, donde el costo de las materias primas secundarias provenientes del reciclaje sea competitivo en el mercado; así como un enfoque sistémico de la gestión de la cadena de suministro, evaluando las interconexiones entre la energía producida, el material extraído y el entorno natural (Hungaro et al. 2021; MacArthur et al. 2013).

Según la Fundación Ellen MacArthur, la aplicación de la economía circular se rige por tres principios:

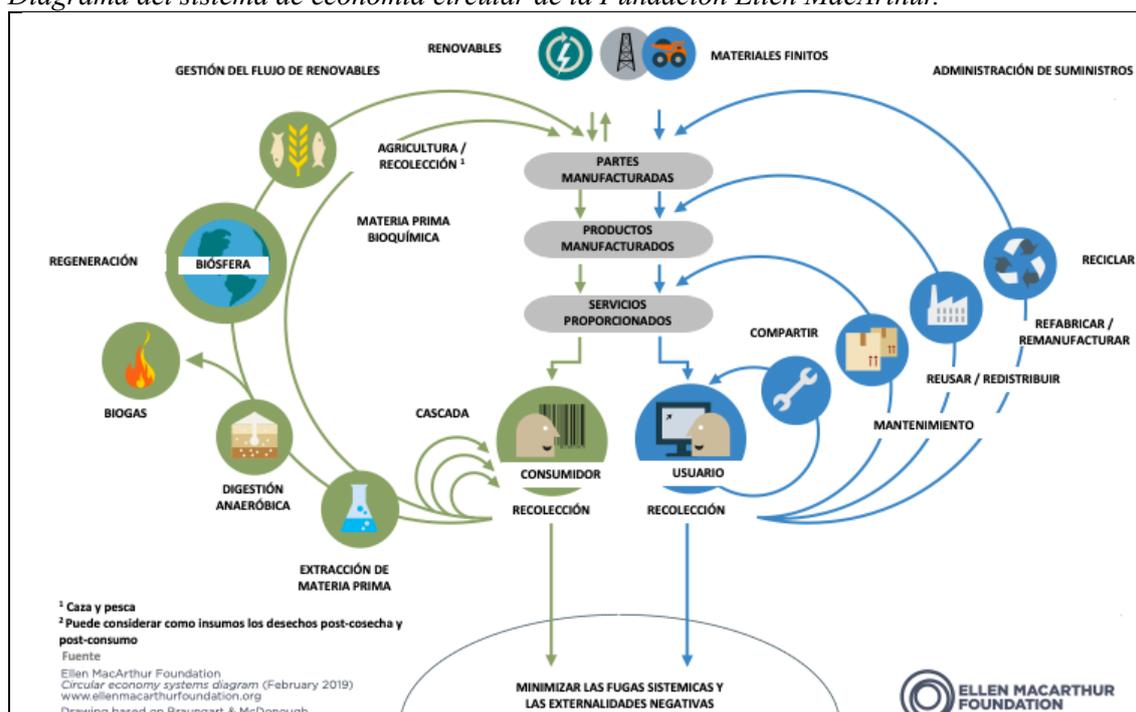
1. Los residuos equivalen a los alimentos: redefinir la finalidad de los productos cuando concluya su vida útil puede prolongar su durabilidad y reducir el impacto ambiental de la fabricación de nuevos productos. Dentro de un circuito cerrado, el mantenimiento, la reutilización, la renovación y el reciclaje adecuados pueden ampliar el ciclo de vida de los productos. Estos productos ya no deben considerarse residuos, sino insumos esenciales para fabricantes y proveedores de servicios.

2. Utilizar recursos renovables: Al aumentar la utilización de recursos y energía renovables o derivados de residuos, el modelo de economía circular podría crear nuevos tipos de puestos de trabajo y reducir el impacto medioambiental, incluidas las emisiones de carbono.

3. Aumentar la resistencia mediante la diversidad reducir el consumo de materiales vírgenes y la generación de residuos: es necesario para reorientar los productos de un proceso de fabricación a otro. Por lo tanto, diseñar un modelo de economía circular requiere reunir a varias empresas y partes interesadas, que cumplen diferentes funciones dentro de un sistema de economía circular.

**Figura 1.**

*Diagrama del sistema de economía circular de la Fundación Ellen MacArthur.*



*Fuente:* Traducción propia con información obtenida de Fundación Ellen MacArthur (2022). <https://emf.thirdlight.com/link/bxqwo5kx531q-2syjxg/@/preview/1?o>

Nota: El diagrama del sistema de economía circular, conocido como diagrama de mariposa, ilustra el flujo continuo de materiales en una economía circular. Hay dos ciclos principales: el ciclo técnico y el ciclo biológico. En el ciclo técnico, los productos y materiales se mantienen en circulación a través de procesos como la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. En el ciclo biológico, los nutrientes de los

materiales biodegradables se devuelven a la Tierra para regenerar la naturaleza (Fundación Ellen MacArthur 2022).

Los principios de economía circular, pueden aplicarse al sector transporte, al reducir el uso de materiales “nuevos” y disminuir la generación de gases efecto invernadero en la transformación de los mismos, sin embargo, se requiere de adopción de tecnología que permitan dar un nuevo uso a aquellas partes y componentes cuya vida útil ha terminado, además de implementar el uso de nuevos materiales que permita su transformación y reutilización de manera sencilla (Bleischwitz et al. 2017). También, se consideran algunas estrategias para aprovechar el uso de materiales y mitigar el impacto negativo en la sociedad y medio ambiente (Potting et al 2017).

**Figura 2.**  
Estrategias economía circular

<p>Economía circular</p> <p style="text-align: center;">↑</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Incrementar circularidad</div> <p style="text-align: center;">↑</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Mayor nivel de circularidad = menor requerimientos de recursos naturales</div> <p style="text-align: center;">↑</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Economía lineal</div>	Estrategias		
	Producción inteligente y uso de la manufactura	R0 Residuos	Hacer un producto redundante
		R1 Repensar	Aumentar la utilización del producto
		R2 Reducir	Consumir menos: aumentar la eficacia
	Extender la vida de partes y productos	R3 Re-utilizar	Reutilización de productos/componentes en funcionamiento
		R4 Reparar	Reparación para mantener las prestaciones originales
		R5 Refabricar	Restaurar y actualizar el rendimiento
		R6 Remanufacturar	Utilizar componentes en un nuevo producto con la misma función
		R7 Readaptar	Utilizar componentes en un nuevo producto con una función diferente
	Utilidades de aplicaciones y materiales	R8 Reciclar	Materiales de proceso listos para la nueva fábrica
R9 Recuperar		Recuperación de energía mediante incineración	

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Potting et al (2017) y Domone et al. (2021)

Un mayor nivel de circularidad de los materiales en las cadenas de productos significa que, en principio, se necesitaran menores cantidades de recursos naturales para la producción de nuevos materiales (primarios o vírgenes). La producción de materiales evitada beneficia al medio ambiente. En la práctica, sin embargo, aumentar la circularidad de una cadena de productos puede conducir a una menor circularidad en otra.

## **Economía circular en el transporte aéreo**

La cadena global de valor de la industria aeronáutica tiene el potencial para ser reformada mediante los principios de la economía circular (OACI, 2022), desde el diseño de aeronaves, sus partes y componentes, hasta la gestión y uso en el final de su vida útil. En sus inicios, la industria aeroespacial comercial estableció de forma natural una economía lineal en la que se otorga valor económico a los productos (aeronaves, piezas de recambio), con un crecimiento económico estrechamente vinculado al uso de los recursos naturales (Domone et al. 2021).

La aeronave es utilizada durante su vida útil, la que comprende 30 años para aviones de pasajeros y 20 años más para aviones de carga, este funcionamiento se mantiene mediante la compra y cambios de piezas gastadas o cuya vida llegó a su límite de acuerdo con las horas de vuelo de las aeronaves, al final, tanto las piezas y componentes como la aeronave solían desecharse como residuos. Este planteamiento se basaba en la premisa de que los materiales eran baratos y el coste de la mano de obra elevado, por lo que el valor de la reutilización o el reciclado era bajo.

La mitigación del impacto que la industria aérea tiene en el medio ambiente se había centrado en la gestión de residuos, sin embargo, el incremento en la atención a la sostenibilidad medioambiental y un aumento de la presión legislativa y social sobre las empresas aeroespaciales, ha tenido como consecuencias que existan cambios durante toda la cadena de suministro. Las aeronaves cuya vida útil había llegado a su límite eran almacenadas en aeropuertos o en lugares destinados para ello como es el cementerio de aviones más grande del mundo, conocido bajo el nombre de “*Aerospace Maintenance and Regeneration Group (AMARG)*” el cual se encuentra en la base aérea *Davis-Monthan*, de Tucson, Arizona.

Con base en la estrategia de la economía circular, se han desarrollado e implementado algunas iniciativas para el reciclaje de aeronaves, como es el proyecto PAMELA<sup>3</sup> impulsado por Airbus, sin embargo, éstas aún se consideran como incipientes porque no existe una regulación internacional para el manejo final de la vida útil de las aeronaves (Dolganova, I., Bach, V., Rödl, A. et al, 2022).

Aunado a lo anterior, el modelo de economía lineal utilizado para la producción de aeronaves, consume energía en grandes cantidades, además que es altamente dependiente de recursos materiales como son titanio, acero, aluminio, aleaciones de estos y compuestos (que suelen incluir polímeros y fibra de carbono) (Dolganova, I., Bach, V., Rödl, A. et al, 2022), lo que pone en duda la disminución del impacto ambiental que el transporte aéreo tendrá en 2035.

---

<sup>3</sup> Proceso de Gestión Avanzada de Aeronaves al Final de la Vida con el que busca reciclar hasta el 90% de las piezas y materiales de un avión. Este proyecto no es nuevo: se remonta a 2006, cuando la empresa europea realizó los primeros experimentos para ver cómo se podía desarmar y reciclar un viejo A300.

La transición de una economía lineal a una circular se propone como una forma eficaz de abordar las emisiones relacionadas con la producción y el mantenimiento de las aeronaves. Al reciclar y reutilizar los productos en lugar de desecharlos tras su uso, la economía circular conserva el valor de los productos y materiales mejor que la economía lineal actual. Al minimizar la demanda de materiales y energía, así como la generación de residuos, la economía circular también contribuye a reducir, o incluso eliminar, las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la producción. Estos principios pueden aplicarse principalmente en dos rubros del transporte aéreo: 1. La fabricación de aeronaves y 2. la gestión de los aeropuertos.

### **Innovaciones aeronáuticas y la economía circular**

De acuerdo con el Manual de Oslo (2018) una innovación es un producto o proceso (o combinación de estos) nuevo o mejorado que difiere significativamente de los productos o procesos anteriores de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales (producto) o puesto en uso por la unidad (proceso). No solo se basa en desarrollar nuevos productos, también supone impulsar nuevos modelos de negocio, ofrecer nuevos servicios y mejorar procesos para hacer más fácil la vida de las personas.

También puede ser entendida como el arte de transformar las ideas y el conocimiento en productos, procesos o servicios nuevos, significativamente mejores que los existentes, y sobre todo, así sean valorados o reconocidos por el mercado, que además se traduce, en una fuente determinante de ventajas competitivas (Fernández, 2016).

Se identifican cuatro tipos de innovación de acuerdo con el resultado final: 1. Innovación de productos, 2. Innovación de procesos, 3. Innovación de mercadotecnia y 4. Innovación organizacional (Manual de Oslo, 2018). La importancia de la innovación dentro de las organizaciones radica en que no sólo permite obtener o mantener una ventaja competitiva a través de la mejora o diversificación de los procesos o productos ofertados, también para hacer frente de manera oportuna a los cambios y amenazas surgidos en su entorno (Teece, 1997, 2007).

Desde la perspectiva de la economía evolutiva, existe una estrecha relación entre innovación y desarrollo, en este sentido, ante el declive de un sistema de producción lineal, donde los recursos son cada vez más escasos, incorporar actividades de innovación para migrar a una economía circular resulta una alternativa viable para que las empresas sigan vigentes. Este nuevo modelo busca producir de manera eficiente, tener en cuenta el medio ambiente, reducir los desechos al máximo por medio de la reutilización, en donde los desechos dejen de serlo para empezar considerarlos como recursos, mediante cambios en la cadena de producción y suministro (Inbernó y Souto, 2023).

Para el caso del transporte aéreo, existen dos grandes nichos de oportunidad para implementar la economía circular, el primero de ellos se refiere al proceso de producción de las aeronaves, el cual comprende las actividades de diseño e investigación, producción de piezas y componentes, sub

ensamblaje, ensamblaje final y actividades de post venta (como son los servicios de mantenimiento, reparación y operaciones). El segundo aspecto donde podría aplicarse la economía circular es en la operación de aeropuertos.

### **Método de investigación**

La investigación es de tipo descriptivo, en primera instancia se realizó una revisión de literatura en la base de datos *Scopus* con las palabras clave “*circular economy*” y “*aerospace industry*”, se obtuvieron 14 resultados, lo que denota que en la parte aeroespacial es un tema poco estudiado, además es un tema emergente de estudio ya que los primeros documentos se publicaron en 2016.

Entre los temas analizados se encuentran el uso de nuevos materiales, más ligeros y menos contaminantes, la adopción de energías renovables como el etanol; se hace énfasis en el diseño de partes, componentes y las aeronaves como punto de partida para implementar los principios de economía circular.

Ante la carencia de publicaciones, se recurrió a fuentes de información secundaria como son informes de organismos no gubernamentales y agencias especializadas. Se identificaron dos áreas para aplicar la economía circular en la industria aeroespacial, como son la producción de aeronaves, sus componentes y la operación de aeropuertos.

La industria aeroespacial ya ha aplicado algunas iniciativas de diseño orientadas a la circularidad, especialmente a las de reciclaje, desmontaje, mejora y reutilización. Se ha observado que los componentes y materiales utilizados por la industria aeroespacial pueden ser reutilizados por otros sectores industriales (como el del mueble), a través de estrategias de reutilización y reciclaje. La viabilidad de estos procesos de diseño en productos complejos, como el avión, exige prestar atención al diseño para el desmontaje en las primeras fases del desarrollo de nuevos productos (Rodrigues et. al., 2022)

### **Producción de aeronaves y sus componentes**

Como se mencionó, el eje central en un modelo de economía circular es mantener el valor de insumos y materiales el mayor tiempo posible, mediante su reciclaje y reutilización, reduciendo así la demanda de recursos naturales. Como se observó en la Figura 3, para obtener un bien final, en el caso una aeronave, en primera instancia se necesita obtener la materia prima, para que ésta sea transformada en las partes y componentes necesarios para el ensamblaje final.

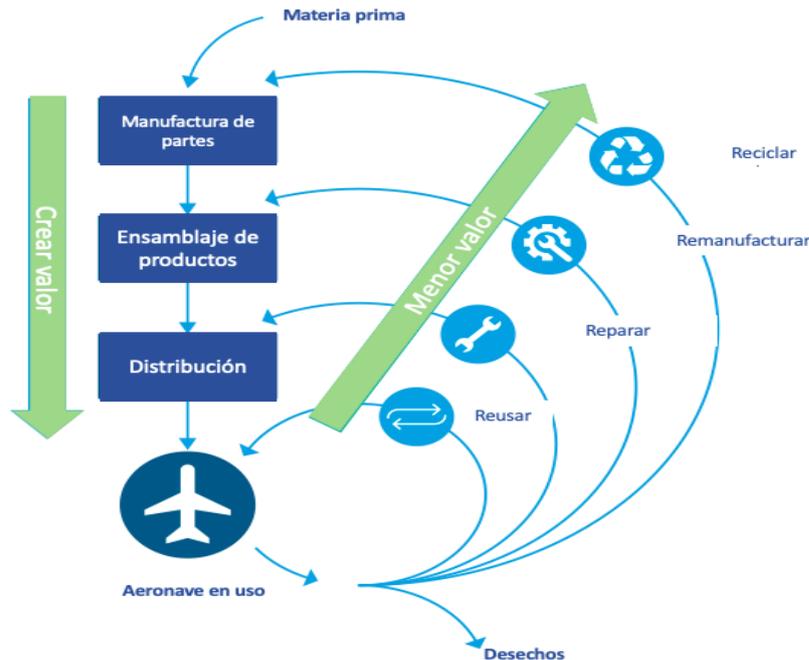
Cuando una aeronave cumple su ciclo de vida (medido en horas de vuelo)<sup>4</sup>, es necesario que se realicen acciones de mantenimiento y en su caso reparación, en este proceso, se realizan cambios de partes y componentes, los cuales en el modelo de economía lineal son desechados incrementando el número de contaminantes.

---

<sup>4</sup> El servicio de mantenimiento se realiza cada 400-600 horas o cada 200-300 ciclos (el despegue y el aterrizaje se consideran un ciclo único para la aeronave), dependiendo de la hora de la aeronave.

Bajo el modelo de economía circular, se propone que las partes y componentes sean reciclados, reparados y reutilizados para evitar la excesiva generación de residuos. Además, esto supone que se obtengan ganancias para las empresas al reducir también los costos de obtención y transformación de material primas.

**Figura 3.**  
*Economía circular en la producción de aeronaves y sus componentes*



*Fuente:* Adaptación y traducción de Domone et al 2021.

Sin embargo, en una industria que depende en una gran medida de la tecnología y que cuenta con altos estándares de calidad, es difícil pensar que la migración hacia una economía circular pueda darse sin la generación de innovaciones y desarrollos tecnológicos. En este sentido, se identificaron algunas tecnologías que pueden contribuir al cambio en el sistema de producción (Véase Tabla 1).

**Tabla 1.**  
*Alternativas tecnológicas para una economía circular en el transporte aéreo*

Tecnología	Descripción	Aplicación en el modelo de economía circular en el transporte aéreo
Manufactura aditiva	<p>Es una rama de los procesos de fabricación de más reciente uso industrial. debido a sus aplicaciones, usos principales y funcionamiento se le conoció como impresión 3D y se popularizo como herramienta de Prototipado Rápido.</p> <p>Actualmente, la MA se clasifica como parte de los procesos de Manufactura Digital que han tomado auge con la llamada revolución</p>	<p>Las piezas metálicas de fabricación aditiva se utilizan en el sector aeroespacial para piezas funcionales, como álabes de turbinas, sistemas de inyección de combustible y aspas.</p> <p>La optimización topológica de las piezas puede mejorar la funcionalidad y reducir el peso. Unas piezas más ligeras contribuyen a reducir el peso</p>

	<p>industrial 4.0, y es una de las tecnologías clave de la misma.</p> <p>La ASTM (American Society for Testing and Materials) propuso siete familias que permiten identificar el principio técnico bajo el cual funciona cada proceso. Estas siete familias son: fotopolimerización, fusión por cama de polvos, inyección de aglutinante, inyección de material, laminación, extrusión de material, disposición directa de energía e híbrido.</p>	<p>de la aeronave y, por consiguiente, el consumo de combustible.</p>
Gemelos digitales	<p>Los gemelos digitales o “<i>digital twins</i>” son un modelo virtual que refleja con exactitud un objeto físico, proceso o sistema. Se utilizan para realizar simulaciones y estudiar el comportamiento de un producto digital, para después adaptar las soluciones al producto real de una manera eficiente.</p>	<p>Pruebas en motores y turbinas.</p> <p>También pueden colocarse en aeronaves en funcionamiento para recabar información que permita hacer mejoras a partes y componentes claves.</p>
Inteligencia artificial (IA)	<p>La IA es un sub-grupo de las tecnologías que dieron lugar a la reciente era de la “cuarta revolución industrial”, dos y comprende modelos y sistemas que llevan a cabo funciones generalmente asociadas a la inteligencia humana, como razonar y aprender. La IA puede complementar las habilidades de las personas y expandir sus capacidades. Asimismo, permite a los seres humanos aprender más rápido del feedback, manejar la complejidad de manera más eficaz, y sacar mejor provecho de la abundancia de datos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseñar productos, componentes y materiales circulares. La IA puede mejorar y acelerar el desarrollo de nuevos productos, componentes y materiales aptos para una economía circular a través de procesos de diseño iterativos asistidos por aprendizaje automático (ML) que hacen posible la elaboración y la prueba de prototipos en ciclos rápidos.</li> <li>- Operar modelos de negocios circulares. La IA puede amplificar la fortaleza competitiva de los modelos de negocios de la economía circular al combinar datos en tiempo real</li> </ul>

		<p>e históricos sobre productos y usuarios.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimizar la infraestructura circular. La IA puede ayudar a construir y mejorar la infraestructura de logística inversa necesaria para “cerrar el círculo” con productos y materiales, mejorando los procesos de clasificación y desmontaje de productos, re-manufactura de componentes y reciclaje de materiales.</li> </ul>
Internet de las cosas	Objetos conectados, capaces de almacenar y conectar una cantidad de datos enorme que después, gracias a programas de software cada vez más complejos, serán analizados para devolver información útil.	Participación en la creación de ciudades inteligentes, en el uso de aeropuertos.

*Fuente:* Elaboración propia con información obtenida de CIDESI (2022); IBM (2023); Domone et al. (2021), McKinsey Sustainability (2019);

### **Operación en tierra, los aeropuertos**

Como se mencionó, existen diversas propuestas para implementar los principios de economía circular en el diseño y construcción de aeronaves, sin embargo, el 2% de la contaminación generada por el transporte aéreo se origina en las operaciones en tierra, es decir, en los aeropuertos. Ante este panorama, se han emitido declaraciones por parte de especialistas de la industria que señalan que “Las aeronaves se van modernizando cada vez más y un aeropuerto se debe a las aeronaves. En función de eso, la economía circular toma un nivel preponderante dentro de pocos años en las terminales aéreas” (Pereira, 2022).

En los aeropuertos se generan aguas residuales, cuyo tratamiento puede generar metano, uno de los principales gases de efecto invernadero. En las instalaciones, además, se utiliza tanto aire acondicionado como sistemas de iluminación y se producen residuos en restaurantes y tiendas. A ello se suma el uso de la infraestructura para la aviación. Es decir, “todo lo relativo al mantenimiento de las aeronaves y las pistas, desde derrames accidentales de combustibles al uso de aceites o anticongelantes o la contaminación producida por los vehículos utilizados” (Pereira, 2022).

Por lo anterior, resulta de suma importancia implementar acciones que permitan disminuir el impacto que generan los aeropuertos tanto en el medio ambiente como en las personas que

habitan cerca de ellos. En la Tabla 2 se presentan algunas acciones implementadas en aeropuertos internacionales que ya operan bajo el modelo de economía circular.

**Tabla 2.**

*Acciones para migrar hacia una economía circular en los aeropuertos*

<b>Aeropuerto</b>	<b>Acciones implementadas</b>
Aeropuerto internacional de Heathrow en Londres	<p>En el aeropuerto londinense de Heathrow implementó acciones de redistribución de instalaciones, equipos y desmantelamiento de estos durante los trabajos modernización.</p> <p>También ha diseñado la nueva terminal, que forma parte del programa de ampliación, como un espacio cubierto en el que las estructuras y los edificios pueden reorganizarse con el tiempo para responder a los cambios comerciales, de seguridad y de seguridad, evitando al mismo tiempo las demoliciones tradicionales asociadas a las reformas al utilizar un kit de piezas estandarizado para la construcción de edificios que pueden desmontarse y reutilizarse varias veces con distintas configuraciones.</p>
Aeropuerto londinense de Gatwick	<p>Invierte en la conversión de residuos en energía, convirtiendo los restos de comida de los vuelos y otros tipos de residuos orgánicos en combustible de biomasa para proporcionar calefacción a la Terminal Norte.</p>
Aeropuerto internacional de Indianápolis, Estados Unidos	<p>Se inclina por el uso de pavimentos con bajas emisiones de carbono, están poniendo en tela de juicio los métodos y materiales tradicionales utilizados en sus pistas y calles de rodaje.</p>
El Aeropuerto Schiphol de Ámsterdam y el	<p>Han mejorado su rendimiento operativo en materia de gestión de recursos y residuos, en respuesta al pensamiento de la economía circular.</p>
Aeropuerto Internacional de Vancouver	
Aeropuerto Internacional de Portland	
Aeropuerto de Queenstow	

*Fuente:* Elaboración propia con información obtenida de Danson (2023)

Otras iniciativas para que los aeropuertos operen en un modelo de economía circular contemplan la eficiencia energética, mayor control en el despegue y aterrizaje de aeronaves, lo que disminuirá las emisiones producidas mientras estas se encuentran en tierra.

## Conclusiones

Aunque trabajos recientes indican que la economía circular es una de las principales tendencias en sostenibilidad ambiental, poco se sabía sobre sus posibilidades de aplicación en empresas de la industria aeroespacial, por lo que este estudio pretende contribuir a ampliar la investigación en este campo.

Para el sector de la aviación, la economía circular es un concepto emergente y, aunque su aplicación aún no está generalizada, la utilización de estrategias de la economía circular puede ofrecer valiosas oportunidades de aprendizaje para el futuro. La aviación es un sector que espera un crecimiento sustancial, ya que se prevé que el tráfico aéreo mundial anual se duplique de aquí a 2035, con una tasa media de crecimiento anual del 4,4%. Según Boeing y Airbus, la proyección de nuevos aviones entregados para 2034 sería de 38.050 y 32.585, respectivamente.

Todas las estimaciones indican un aumento potencial del consumo de recursos, los residuos y la generación de emisiones en la aviación mundial. La transición de la economía lineal a la economía circular puede contribuir a reducir los impactos medioambientales adversos y los costes económicos asociados.

El análisis realizado destaca la necesidad de desarrollar y utilizar combustibles alternativos, también se identifica que las prácticas de economía circular dependen de los diseños de productos. Migrar hacia una economía circular no es una tarea sencilla, ya que en el mundo de la aviación participan diferentes actores con funciones muy particulares, se encuentran los diseñadores y ensambladores de aeronaves, quienes deben hacer énfasis en utilizar partes y componentes que puedan ser reutilizados, lo que implicara un cambio significativo en su cadena de proveeduría.

También se encuentran los principales usuarios de las aeronaves, las líneas aéreas, las cuales deberán implementar mejoras en el consumo de energía y manejo de residuos. En cuanto a los aeropuertos, una parte importante es el uso energético y gestión de residuos, pero también la administración de llegadas y salidas, así como contar con la infraestructura adecuada que permita reutilizar el agua, o mejor los sistemas de ventilación sin contaminar.

Por lo general, las transiciones hacia la sustentabilidad suelen implicar cambios sociales, organizacionales, normativos, cambios en los hábitos de los consumidores, entre otros. Sin embargo, estas transiciones suelen estar acompañadas de innovaciones y desarrollos tecnológicos. Para el caso de la aviación, se contemplan tecnologías como la manufactura aditiva, el uso de gemelos digitales, el internet de las cosas y la inteligencia artificial como mecanismos que contribuyan en esta transición.

## Referencias

- CIDESI. (2022). *¿Qué es la Manufactura Aditiva? Generando valor a través del conocimiento*. <https://www.cidessi.com/site/que-es-la-manufactura-aditiva/>
- Danson, T. (2023). *Applying Circular Economy Principles to Aviation Scaling up sustainable practices to achieve net zero*. <https://www.wsp.com/es-mx/insights/aplicacion-de-los-principios-de-la-economia-circular-a-la-aviacion>
- Dolganova, I., Bach, V., Rödl, A. (2022). Assessment of Critical Resource Use in Aircraft Manufacturing. *Circ.Econ.Sust.* 2, 1193–1212. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00157-x>
- Domone, T., Bliss, P. and Copus, M. (2021). *A Circular Economy for Civil Aerospace*. ATKINS. [https://www.researchgate.net/publication/354652228\\_A\\_Circular\\_Economy\\_for\\_Civil\\_Aerospace/link/6144556cd5f4292c01fef4f0/download](https://www.researchgate.net/publication/354652228_A_Circular_Economy_for_Civil_Aerospace/link/6144556cd5f4292c01fef4f0/download)
- Fernández, M. (2016). *¿Qué es la innovación educativa?* En Fernández, M. y Alcaraz, N. (coord.) (2016). *Innovación Educativa: más allá de la ficción* (pp. 27-52). Ediciones Pirámide
- Hungaro, e. Andrade, R., Levyb, W., Melo, D. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers* 2, 79–86
- ICAO Secretariat. (2022). *Introduction to Circular Economy, chapter eight Towards a Circular Economy*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/CircularEconomy.aspx>
- IBM. (2023). Soluciones IoT. <https://www.ibm.com/mx-es/cloud/internet-of-things>
- Imberνό, A. y Souto, L. (2023). Innovación y economía circular, un binomio perfecto. *Econ. y Desarrollo*, 167 (2). ISSN 0252-8584
- Jaramillo, P., S. Kahn Ribeiro, P. Newman, S. Dhar, O.E. Diemuodeke, T. Kajino, D.S. Lee, S.B. Nugroho, X. Ou, A. Hammer Strømman, J. Whitehead. (2022). Transport. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926.012
- E. Macarthur, et al. (2013). Towards the circular economy *J. Ind. Ecol.*, 2, 23-44. [https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport\\_McKinsey-Towards\\_A\\_Circular\\_Economy.pdf](https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf)
- McKinsey Sustainability. (2019). *Inteligencia artificial y la economía circular: La IA como herramienta para acelerar la transición*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/artificial-intelligence-and-the-circular-economy-ai-as-a-tool-to-accelerate-the-transition/es-CL>
- OACI. (2022). *Introduction to Circular Economy*. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019\\_pg275-278.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg275-278.pdf)

OECD/Eurostat (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, 4th Edition. The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing.

<https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>

Pereira, M. (2022). *El impacto de los aeropuertos en el medio ambiente.*

[https://eng.dkv.es/corporativo/blog-](https://eng.dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/aeropuertos#:~:text=El%20experto%20recuerda%20que%20en,residuos%20en%20restaurantes%20y%20tiendas.)

[360/medioambiente/contaminacion/aeropuertos#:~:text=El%20experto%20recuerda%20que%20en,residuos%20en%20restaurantes%20y%20tiendas.](https://eng.dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/aeropuertos#:~:text=El%20experto%20recuerda%20que%20en,residuos%20en%20restaurantes%20y%20tiendas.)

Potting, M., Hekkert, M.P., Worrel, E. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain.* PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>

Redacción A21. (2019). *Airbus tiene proceso de reciclaje para aeronaves retiradas*

<https://a21.com.mx/aeronautica/2019/07/15/airbus-tiene-proceso-de-reciclaje-para-aeronaves-retiradas>

Rodrigues Dias, V., Jugend, D., Camargo Fiorini, P., Amaral Razzino, C., Paula, M. (2022) Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: Practices, opportunities and challenges. *Journal of Air Transport Management*, 102, ISSN 0969-6997,

Teece, D., Pisano, G., y Suen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18 (7), 509 - 533.