



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.

La Educación en Economía Circular para la Creación de Valor en el Sector Aeronáutico Mexicano

Romina Castillo Malagón¹
María Angélica Cruz Reyes²

Resumen

El sector aeronáutico, adquirió el compromiso de reducir el impacto ambiental que generan sus operaciones a nivel global, por lo que, la adopción de los principios de economía circular es una alternativa para cumplir con dicha meta sin dejar de ser competitivas. Las características propias de la industria, hacen complejo migrar de un sistema de producción lineal a uno circular; en este sentido, la Educación Superior puede favorecer esa transición. La pregunta de investigación es ¿cómo contribuir desde la Educación a Nivel Superior para la incorporación de los principios de economía circular en el sector aeronáutico y a la vez generar valor? Se analizaron programas de estudio relacionados con las carreras de ingeniería aeroespacial a nivel mundial y las carreras impartidas en la Universidad Aeronáutica de Querétaro, se concluye que, incorporar los principios de la economía circular, traerá beneficios a nivel económico, social y medioambiental además de facilitar la generación de valor en las empresas aeronáuticas del estado de Querétaro.

Palabras clave: Economía circular, educación superior, sustentabilidad, ingeniería, creación de valor, industria aeroespacial

Abstract

The aeronautical sector has committed to reducing the environmental impact of its operations globally, so adopting the principles of the circular economy is an alternative way to meet this goal while remaining competitive. The characteristics of the industry make it challenging to transition from a linear to a circular production system; in this sense, higher education can facilitate this shift. The research question is: How can higher education contribute to the incorporation of circular economy principles in the aeronautical sector while generating value? Study programs related to aerospace engineering degrees worldwide as well as the degrees offered at the Aeronautical University of Querétaro were analyzed. It was concluded that incorporating the principles of the circular economy will bring economic, social, and environmental benefits, as well as facilitate the generation of value in aeronautical companies in the state of Querétaro.

Keywords: Circular economy, higher education, sustainability, engineering, value creation, aerospace industry.

¹Centro de Docencia “Ing. Gilberto Borja Navarrete” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

²Instituto Politécnico Nacional, ESCA Tepepan

Introducción

En la actualidad, el mundo está experimentando grandes cambios; las guerras, las crisis financieras, el desempleo, así como la dificultad de obtener materias primas, están impulsando la generación de nuevos modelos productivos y esquemas de negocio. Aunado a lo anterior, el compromiso a nivel mundial por mitigar los efectos del cambio climático y el aceleramiento de la llegada del “Día de la Sobrecapacidad de la Tierra”¹ así como el temor de la comunidad internacional de la llegada del “Día cero”² (se calcula que en 2030 se necesitarán dos planetas para mantener las actuales pautas de consumo derivadas de las actividades humanas) están forzando la implementación de un nuevo modelo económico.

De acuerdo con el Programa para el Medio Ambiente de la Organización de las Naciones Unidas (2024), el mundo se encuentra inmerso en una triple crisis planetaria: la crisis del cambio climático, la crisis de la pérdida de naturaleza y biodiversidad, y la crisis de la contaminación y los residuos, lo que resalta la necesidad de efectuar una transformación hacia el uso eficiente y eficaz de los recursos naturales. Ante este panorama, el concepto de economía circular está tomando una mayor relevancia, al proporcionar un conjunto de estrategias para evitar y reducir el consumo de recursos, energía y emisiones derivadas de la transformación de materias primas en productos funcionales. Estas estrategias también implican ampliar la vida útil de los productos, mantener su valor el mayor tiempo posible y cerrar el bucle de los materiales que intervienen en dichos productos, se promueve la recirculación de materiales y la extensión de la vida útil de los productos.

En este sentido, uno de los sectores que se ha planteado como meta, reducir a cero la huella de carbono que producen sus diferentes operaciones, es el aeronáutico, considerando como alternativa, adaptarse a un modelo de economía circular. Sin embargo, las propias características del sector hacen aún más complejos estos cambios que comienzan desde el inicio del diseño de los productos y servicios ofertados hasta la comercialización de los mismos. (Castillo, Cruz y Romero, 2024)

Migrar de un modelo económico lineal a un modelo de economía circular no es tarea sencilla, requiere de la participación de la industria, la academia y el gobierno como actores clave para garantizar una transición rápida y exitosa hacia un sistema de producción y consumo más sostenible (Bordier, Kirchner & Nussbaumer; 2011). Autores como Tiippana-Usvasalo, Pajunen & Maria (2023)

¹ El Día de la Sobrecapacidad de la Tierra marca la fecha en la que la demanda de recursos y servicios ecológicos de la humanidad en un año concreto supera lo que la Tierra puede regenerar en ese año. En términos económicos sería como agotar el saldo disponible y entrar en números rojos. Es decir, el día en que se entra en un déficit ecológico. (WWF, 2024).

²El "día cero" se refiere a un momento en el futuro en el que no se podrá abastecer la cantidad de agua actual. (López, 2024)

señalan que la forma más profunda de promover esta transformación es implicar a todas las personas a través de la educación. Empezando en preescolar y continuando hasta la universidad, la educación es la mejor manera de hacer posible la transición de una economía lineal a una economía circular.

El sector educativo, desde la escuela primaria hasta los estudios de posgrado, desempeña un papel fundamental a la hora de garantizar que los estudiantes de todas las edades estén equipados con las habilidades y los conocimientos clave para aplicar el pensamiento circular en las carreras que elijan. (Ellen Macarthur Foundation, 2025)

Autores como Stahel (2019); Carbonell-Alcocer et al. (2022), establecen que existe un nexo intrínseco y de retroalimentación positiva entre la educación, la innovación y la economía circular. Estos tres elementos se potencian mutuamente para lograr una transición exitosa hacia un modelo económico más sostenible y resiliente. De manera particular, Walter R. Stahel, en su investigación sobre la economía del rendimiento y la extensión de la vida útil de los productos, destaca la necesidad de una formación en ingeniería que fomente la innovación en el diseño para la durabilidad, la reparabilidad y la reutilización.

Desde la perspectiva de la enseñanza, las universidades tienen un papel clave en la consolidación de la incorporación de los temas de sostenibilidad en los futuros profesionales que liderarán los cambios requeridos por las próximas generaciones en los patrones de producción y consumo, ya que son considerados actores y modelos a seguir en sus comunidades en el ámbito de la responsabilidad social y ambiental. (Mesa y Esparragoza, 2021)

Por lo antes expuesto, se plantea la pregunta de investigación: ¿cómo contribuir desde la educación a nivel superior con la incorporación de los principios de economía circular en el sector aeronáutico y a la vez generar valor? Para dar respuesta a dicha pregunta, se consideró como marco contextual al Aeroclúster de Querétaro y se hizo un estudio de caso sobre la Universidad Nacional Aeronáutica de Querétaro (UNAQ).

La investigación se estructura de la siguiente manera. En el primer apartado, se describe de manera general el sector aeronáutico, el aeroclúster de Querétaro y la Universidad Nacional Aeronáutica de Querétaro; como segundo punto, se abordan los principios de economía circular y contribuciones en el sector aeronáutico. Para dar sustento teórico, en el tercer apartado se retoman algunos principios de economía circular y valor compartido. Por último, se realizó un análisis sobre a enseñanza y ejercicio de la ingeniería en el cumplimiento de los principios de economía circular, a través de la identificación de universidades que contemplan los principios de sustentabilidad en sus

planes de estudio, estos resultados, se utilizan para encontrar puntos en común o áreas de mejora en los planes y programas de la UNAQ. Por último, se presentan algunas conclusiones.

Industria Aeronáutica en el Contexto Mexicano: Clúster Aeroespacial de Querétaro

La industria aeroespacial se define como el conjunto de organizaciones dedicadas al desarrollo de actividades productivas que garantizan la construcción y el diseño de aviones, helicópteros, lanzadores, misiles y satélites, así como los equipos de los que dependen, además de motores y electrodomésticos utilizados a bordo de la aeronave. Este sector se dirige a clientes militares o civiles, empezando por las compañías aéreas y los gestores de redes de telecomunicaciones (Carrincazeaux y Frigant, 2007).

Entre las características específicas de la industria se encuentran: alta intensidad científica y tecnológica, programas de alto coste y riesgo, ciclos muy largos de desarrollo y retorno de inversión, producción en series cortas y con gran valor añadido, colaboración internacional en diseño y desarrollo, papel relevante del gobierno como impulsor, cliente, regulador y defensor del mercado, fuertes barreras de entrada, importancia crítica de la calidad y de la seguridad, ciclos de vida muy largos y relaciones entre la industria civil y militar. (Casalet, 2013; López et al., 2012, Hernández, 2018) Estos factores sumados a la heterogeneidad de las Pyme mexicanas, han dificultado la absorción de las derramas de conocimiento, generación de innovaciones y su escalamiento.

Las empresas aeronáuticas mexicanas, dedicadas en su mayoría a la fabricación de piezas, componentes y servicios de mantenimiento y reparación de aeronaves se encuentran distribuidas en 19 estados de la República. Además, se han formado cinco clústeres aeroespaciales en expansión, ubicados en los estados de Nuevo León, Chihuahua, Baja California, Sonora y Querétaro. Este último ha tenido un gran crecimiento en los últimos años al contar con varias empresas multinacionales que funcionan como ancla, entre las que se encuentran: una filial de la firma Bombardier (una de las cuatro compañías líderes en el sector, con sede en Canadá), el grupo francés Safran y el fabricante español de fuselaje Aernnova.

El clúster Aeroespacial de Querétaro es el primer receptor de Inversión Extranjera Directa a nivel nacional con una inversión acumulada de 989,71 millones de dólares al tercer trimestre de 2020. Los productos exportados son mercancías para el ensamblaje, fabricación de aeronaves o aeropartes, turborreactores, trenes de aterrizaje y sus partes, y mercancías destinadas a la reparación o mantenimiento de aeronaves y sus partes. Algunas de las firmas localizadas en este territorio son: Bombardier, Aernova, Airbus, Aero TTP, ETU División Aeronáutica, Global Composites Manufacturing, HYRSA, ITP Aero, RYMSA y PCNC, entre otras. (Castillo, 2024)

El clúster opera bajo el modelo de la quintuple hélice³ y una de sus mayores fortalezas es la Universidad Aeronáutica de Querétaro (UNAQ), la cual fue creada con la intención de atender de manera particular los requerimientos del sector aeronáutico y posicionar a Querétaro como actor clave en la atracción de inversión extranjera directa en este sector. De manera general, la importancia de la UNAQ radica en:

- **Formación de Capital Humano:** La UNAQ forma profesionales, técnicos e investigadores con las competencias y conocimientos que la industria demanda. Esto asegura que el crecimiento del sector esté acompañado de personal capacitado.
- **Innovación y Desarrollo Tecnológico:** La universidad colabora en proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico con las empresas del sector, fortaleciendo la innovación y la cadena de proveeduría.

Se imparten programas educativos diseñados para satisfacer las necesidades específicas de la industria aeronáutica entre los que se encuentran:

- **Ingeniería Aeronáutica en Manufactura (IAM):** Se enfoca en los procesos de producción y manufactura de aeronaves y sus componentes.
- **Ingeniería en Diseño Mecánico Aeronáutico (IDMA):** Capacita a los estudiantes en el diseño y creación de componentes mecánicos para aeronaves.
- **Ingeniería en Electrónica y Control de Sistemas de Aeronaves (IECSA):** Prepara a los profesionales para el control y la electrónica de los sistemas de aeronaves.
- **Ingeniería en Mantenimiento Aeronáutico (IMA):** Forma especialistas en el aseguramiento de la aeronavegabilidad y el mantenimiento de aeronaves y sus componentes.

Además de las ingenierías, la universidad ofrece programas de Técnico Superior Universitario (TSU) y posgrado para una formación completa en el sector.

Economía Circular y Creación de Valor

De acuerdo con la Fundación para la Economía Circular de España (2025), la economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos naturales se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva

³ Academia, gobierno, industria, startups e instituciones financieras.

economía, circular -no lineal-, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía.

Para la Fundación Ellen Macarthur (2025), es un marco de soluciones sistémicas que hace frente a desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los residuos y la contaminación y se basa en tres principios fundamentales: eliminar los residuos y la contaminación, mantener los productos y materiales en uso y regenerar la naturaleza. Estos principios, impulsados por el diseño, buscan crear un sistema económico regenerativo que minimice el impacto ambiental.

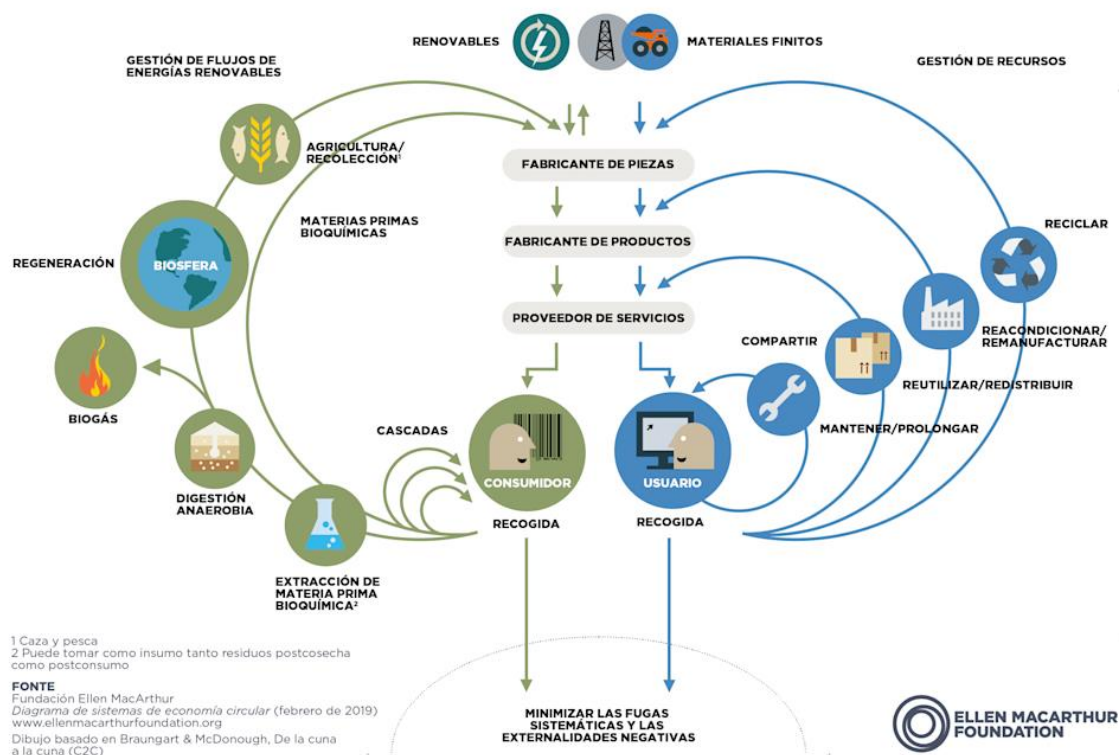
De acuerdo con Espinoza (2023), de manera formal, el término “economía circular” se utilizó por primera vez en la obra *"Economics of Natural Resources and The Environment"*, de los economistas ambientales David W. Pearce y R. Kerry Turner. Aunque en los últimos años el concepto de economía circular se ha popularizado y adoptado a nivel mundial como una alternativa para mitigar los efectos del cambio climático y recuperarse de la crisis económica, sus orígenes se remontan a los años setenta.

Entre los antecedentes directos de la economía circular, se encuentra el eliminar o reducir la generación de desechos, imitando el funcionamiento cíclico de la naturaleza, además, se busca incrementar el ciclo de vida de los productos para disminuir el consumo de materia prima y eventualmente, eliminar la generación de residuos. Además de los beneficios medio ambientales que se espera tener al aplicar el modelo de economía circular, también se pretende obtener beneficios económicos al incrementar el valor de los productos diseñados y fabricados bajo este enfoque.

La Figura 1 denominada “Diagrama de mariposa”, es una propuesta de la Fundación Ellen Macarthur para ejemplificar el funcionamiento de la economía circular en la gestión de recursos naturales renovables y no renovables. El diagrama muestra que los bucles internos más pequeños están rodeados por los bucles externos más grandes. En estos bucles internos es donde se puede capturar más valor porque conservan más del valor incorporado de un producto al mantenerlo entero. Por lo tanto, los bucles internos como compartir, mantener y reutilizar deben priorizarse sobre los bucles externos que ven cómo el producto se descompone y se vuelve a fabricar. Estos bucles también suponen un ahorro de costes para los clientes y las empresas, ya que utilizan productos y materiales que ya están en circulación, en lugar de invertir en fabricarlos nuevos. El bucle más externo, el reciclaje, es por lo tanto la etapa de último recurso en una economía circular, porque significa perder el valor incorporado de un producto al reducirlo a sus materiales básicos. (Ellen Macarthur Foundation, 2021)

Figura 1

Diagrama de la mariposa



Nota. Ellen Macarthur Foundation (2021)

Desde el bucle más interno, los procesos de economía circular funcionan en diferentes etapas. Desde el estudio y la enseñanza de la ingeniería, es de suma importancia considerar que cada uno de estos procesos funcionará mejor si los productos están diseñados para ese paso. Es decir, que el punto de partida está en el diseño de productos, considerando la facilidad para compartir o reutilizar, que los artículos sean más duraderos, resistentes, con diseños modulares para ser reparados, reemplazados y refabricados o reciclados más fácilmente. (Ellen Macarthur Foundation, 2022)

En la Tabla 1, se describe cada uno de los procesos de la economía circular.

Tabla 1

El ciclo técnico del diagrama de mariposa

Proceso	Descripción
Compartir	Es el primer puerto de escala en el ciclo técnico y, aunque no es apropiado para todos los productos de la economía, tiene el poder de aumentar dramáticamente la utilización de muchos productos. Ejemplo de esto son las plataformas como Airbnb donde se comparten alojamientos o los servicios de auto compartido.
Mantenimiento	Maximizar el valor de un producto al prolongar la vida útil. Mantener la alta calidad de los productos y evitar fallos o deterioro es fundamental.
Reutilizar	Al igual que compartir y mantener, este paso permite que los productos se mantengan en su forma original y para su propósito original. Los modelos de negocio de reutilización están surgiendo en toda la economía, especialmente en el sector de los envases. Los envases reutilizables son una de las maneras más eficaces de abordar los residuos de envases, en particular el plástico, y están siendo adoptados por empresas de todos los sectores, desde la alimentación y las bebidas hasta la cosmética y la limpieza del hogar.
Redistribuir	Al desviar productos de su mercado objetivo a otro cliente, se les da un uso valioso. Por ejemplo, una marca de moda podría redistribuirlos.
Renovar	Devolver los productos a su estado normal es una forma de restaurar su valor. Esto podría incluir la reparación o el reemplazo de componentes, la actualización de especificaciones y la mejora de la apariencia.
Remanufacturar	Esta se lleva a cabo cuando los productos no pueden permanecer en circulación en su estado actual y requieren un trabajo más intensivo para volver a utilizarse. La remanufactura implica la reingeniería de productos y componentes para dejarlos como nuevos, con el mismo nivel de rendimiento o incluso mejor que el de un producto recién fabricado. Los productos o componentes remanufacturados suelen contar con una garantía equivalente o superior a la del producto recién fabricado. Puede requerir mayor inversión en plantas y maquinaria que los circuitos internos del ciclo técnico, pero significa que los productos y componentes no se convierten en residuos y pueden permanecer en la economía, lo que representa un ahorro de costos para las empresas y los clientes.
Reciclar	El último paso del ciclo técnico es el reciclaje. Esto ocurre cuando un producto ya no se puede utilizar y no puede ser reacondicionado ni remanufacturado. Es la forma definitiva de conservar en uso los materiales con los que se fabrica el producto para que no se conviertan en residuos. Con el reciclaje, se pierde el valor inherente de un producto (el tiempo y la energía invertidos en su fabricación), pero se conserva el valor de los materiales. Reciclar significa transformar un producto o componente en sus materiales o sustancias básicos y reprocesarlos para obtener nuevos materiales.

Nota. Elaboración propia con información obtenida de Ellen Macarthur Foundation (2022)

Como se observa en la Tabla 1, la adopción de la economía circular, significa que se deben desarrollar nuevos tipos de competencias y habilidades a nivel personal y organizacional, para modificar las actuales actividades de diseño, la planificación, selección de materiales; en este sentido, la ingeniería juega un rol fundamental para la aplicación de los diferentes procesos que son parte de dicho modelo económico, ya que desde el diseño de los productos, se pueden seleccionar los materiales y componentes idóneos para aplicar acciones de reciclaje, remanufactura, reparación, reutilización, entre otros. De acuerdo con Bocken et al. (2016); Ceschin y Gaziulusoy (2016) la fase de diseño es crucial a la hora de planificar la sostenibilidad o la economía circular.

Porter y Kramer (2011) mencionan que las empresas pueden generar valor económico al mismo tiempo que crean valor social y ambiental porque los problemas sociales y ambientales no son ajenos a los negocios, estos, deben ser vistos como fuentes de oportunidad, innovación y ventaja competitiva. En este sentido, la implementación de los principios de economía circular, pueden facilitar la obtención de valores económicos, sociales y medioambientales, desde el estudio – enseñanza de la ingeniería, las empresas que rediseñan productos y procesos para reducir su impacto ambiental, mejorar condiciones laborales o usar recursos locales innovan más y tienden a ser más competitivas, haciendo más eficiente el uso y aprovechamiento de los recursos, reduciendo los impactos negativos asociados a la generación de desechos y uso de recursos naturales y eventualmente facilitando la apertura de nuevos mercados.

Educación Superior y Economía Circular.

La transición hacia la economía circular exige comprender las prácticas de la sociedad y sus repercusiones, así como las tecnologías, infraestructuras e instituciones asociadas a las comunidades y a las que éstas tienen acceso. (Tiippana-Usvasalo, Pajunen & Holuszko, 2023)

Este concepto ha adquirido gran relevancia al ser promovido como una solución para reducir el daño al medio ambiente, considerando que educar a las personas que cursan estudios a nivel superior es la mejor manera de transitar de una economía lineal a la circular (Tiippana-Usvasalo, Pajunen & Holuszko, 2023). En este sentido, autores como Bugallo-Rodríguez y Vega-Marcote (2020); De la Torre et al. (2021); Mendoza et al. (2019) y Qu et al., (2020) consideran a las instituciones educativas de nivel superior como agentes estratégicos que apoyan dicha transición al contribuir a través de la adaptación en sus planes de estudio y proporcionar a los estudiantes competencias actualizadas que les permitan hacer frente a los nuevos requerimientos del entorno.

De acuerdo con el informe emitido por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO, 2023), las instituciones de educación superior (IES),

necesitan utilizar el conocimiento que producen y la formación de nuevos profesionales, para ayudar a resolver algunos de los mayores problemas del mundo, sobre todo los relacionados con el cambio climático, la pérdida de naturaleza y biodiversidad, así como la desigualdad, la salud, la economía, entre otras. Ante esta nueva realidad en la que el futuro de los seres humanos y de otras especies está en juego, ha llegado el momento de que las IES y sus partes interesadas se replanteen su función en la sociedad y sus misiones clave, y reflexionen como pueden servir de catalizadores para una transición rápida, urgente y justa hacia la sostenibilidad.

Las soluciones para abordar una variedad de problemas necesitan innovaciones que se creen en cadenas y redes, así como en colaboración entre diferentes sectores de la sociedad (Sitra, 2018) siendo la educación una manera para abordar los problemas e implementar un cambio que pueda repercutir a gran escala (Tiippana-Usvasalo, Pajunen & Holuszko, 2023). En este sentido, la naturaleza de la profesión de ingeniero la convierte en un actor central de la innovación: los ingenieros deben estar capacitados para innovar, desarrollar y poner en práctica ideas en un proceso creativo colaborativo que son capaces de dominar.

Aunque el estudio de la educación en economía circular es aún incipiente, en 2019 Kirchherr y Piscicelli hicieron referencia a este concepto por primera vez al describir un curso diseñado para presentar a los estudiantes universitarios el concepto de economía circular; en este sentido, los autores proponen que la educación en economía circular debe contemplar cómo integrar sus principios en diferentes disciplinas y planes de estudio, considerando y/o adaptando diferentes enfoques de enseñanza y aprendizaje para hacerlos más adecuados a los nuevos contenidos, propiciando entre los estudiantes la comprensión de cómo se interrelacionan el medio ambiente, la economía, la sociedad y la cultura. (Whalen et al., 2018).

Por lo antes descrito, se analizaron aquellas instituciones de nivel superior que imparten carreras cuyos planes y programas de estudio contribuyen al cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Estas universidades fueron identificadas a través del *Ranking de Times Higher Education 2025*, el cuál evalúa la contribución de las universidades a los ODS según su impacto social, económico, y ambiental. Se retomaron los resultados de ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) por que este rubro contempla la investigación de las universidades vinculada a alianzas industriales, la financiación que reciben de la industria, las patentes que citan la investigación universitaria y las empresas creadas a partir de la universidad. Por último, se consideraron las universidades que imparten la carrera de ingeniería aeronáutica - aeroespacial. Dichos resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Top 5 universidades que se dedican a la enseñanza de la ingeniería aeronáutica – aeroespacial y contribuyen al cumplimiento de los ODS.

Universidad	País de origen	Descripción
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) ^a	Estados Unidos	El departamento AeroAstro del MIT se enfoca en reducir el impacto ambiental de la aviación y en utilizar la tecnología espacial para resolver problemas terrestres a través del desarrollo de proyectos enfocados a la aeronáutica y al sector espacial. Su Laboratorio de Medio Ambiente de la Aviación (LAE) es un centro clave que se dedica a cuantificar y mitigar el impacto ambiental de la industria. Algunas de sus áreas de enfoque incluyen: ○ Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF): Se investiga la viabilidad técnica y económica de los SAF, evaluando su impacto ambiental y la infraestructura necesaria para su producción y distribución. Por ejemplo, el MIT ha colaborado en estudios sobre la descarbonización de la aviación en América Latina. ○ Diseño de Aeronaves Más Eficientes: Se desarrollan nuevos diseños y materiales para reducir la resistencia aerodinámica y el peso de las aeronaves, lo que disminuye el consumo de combustible y las emisiones. ○ Reducción del Ruido y las Emisiones: Se estudian métodos para disminuir el ruido de los aviones y las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno (NOx) y las estelas de condensación.
Universidad de Stanford ^b	Estados Unidos	El departamento de Aeronáutica y Astronáutica (Aero/Astro) de Stanford investiga tecnologías para hacer que los viajes aéreos sean más eficientes y menos contaminantes. Esto incluye: ○ Diseño de Aeronaves Avanzadas: Se crean nuevos diseños y materiales ligeros para reducir la resistencia aerodinámica y el peso de las aeronaves, lo que disminuye el consumo de combustible. Por

Universidad	País de origen	Descripción
		ejemplo, se investigan aeronaves de propulsión híbrida o eléctrica. ○ Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF): Aunque no se producen en Stanford, la universidad colabora en la investigación de la viabilidad técnica y los efectos en el rendimiento de los SAF. Estos combustibles, derivados de fuentes renovables, pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂. ○ Optimización del Vuelo: Se desarrollan algoritmos y sistemas de control para optimizar las rutas de vuelo en tiempo real. Esto reduce el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y el ruido de las aeronaves.
Universidad de California, Berkeley (UCB) ^c	Estados Unidos	A diferencia del MIT y Stanford, la Universidad de California, Berkeley, no tiene un departamento de ingeniería aeroespacial tan prominentemente separado. Sin embargo, su contribución a la sustentabilidad en este campo se realiza a través del Departamento de Ingeniería Mecánica y otras facultades de investigación, en colaboración con el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (Berkeley Lab). 1. Aviación Sostenible La investigación de Berkeley en aviación sostenible se enfoca en la innovación de materiales y la bioproducción de combustibles: ○ Materiales para la Fabricación Sostenible: Berkeley investiga nuevas metodologías y herramientas para descubrir y fabricar materiales con propiedades superficiales mejoradas de manera sostenible. Por ejemplo, el desarrollo de materiales más ligeros y resistentes podría reducir el peso de las aeronaves, lo que a su vez disminuiría significativamente el consumo de combustible y las emisiones. ○ Biocombustibles de Aviación Sostenibles (SAF): El Berkeley Lab ha realizado avances importantes en la producción de biocombustibles para aviones a partir de microorganismos. Los científicos han utilizado herramientas informáticas avanzadas para optimizar la producción de un componente de biocombustible a partir de bacterias, lo que representa un paso crucial hacia un proceso de

Universidad	País de origen	Descripción
		producción de SAF más sostenible y con menos emisiones de carbono. ○ Propulsión y Eficiencia Energética: La investigación en el campus se extiende a la optimización de los sistemas de propulsión y el desarrollo de tecnologías más eficientes para la aviación. Esto incluye el estudio de aeronaves eléctricas y la mejora de los sistemas de control de vuelo para reducir la energía necesaria para un viaje.
Universidad de Tokyo ^d	Japón	La Universidad de Tokio, a través de su Departamento de Ingeniería Aeroespacial, investiga tecnologías que permitan una aviación más limpia y eficiente. Esto incluye: ○ Diseño y Optimización de Aeronaves: Se trabaja en el desarrollo de nuevos diseños de aviones que reduzcan la resistencia aerodinámica y el consumo de combustible. También se investigan sistemas de propulsión alternativos y se optimizan las rutas de vuelo para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero. ○ Materiales y Estructuras Ligeras: La investigación se centra en nuevos materiales compuestos y estructuras avanzadas que disminuyen el peso de las aeronaves. Esto es crucial para la eficiencia del combustible, ya que un avión más ligero requiere menos energía para volar. ○ Sistemas de Propulsión Híbridos y Eléctricos: Al igual que otras universidades de prestigio, la de Tokio investiga la viabilidad y el desarrollo de sistemas de propulsión híbridos y eléctricos para la aviación.
Universidad de Cambridge ^e	Reino Unido	La Universidad de Cambridge es un actor clave en la Aviation Impact Accelerator (AIA), un grupo de investigación internacional que desarrolla herramientas y modelos para ayudar a la industria y los gobiernos a lograr la descarbonización del sector de la aviación. ○ Evitar Estelas de Condensación: Un hallazgo importante de su investigación es que las estelas de condensación, las nubes que se forman detrás de los aviones, contribuyen significativamente al calentamiento global. Los investigadores de Cambridge sugieren que evitar estas estelas podría reducir el impacto climático de la aviación hasta en un 40%.

Universidad	País de origen	Descripción
		○ Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF): Se investiga la viabilidad de los SAF, pero con un enfoque en su producción sostenible y su impacto en todos los sectores que usan biomasa. La universidad también ha desarrollado tecnología para convertir el CO₂ del aire en combustible de aviación, usando solo luz solar como fuente de energía, lo que podría revolucionar la producción de combustibles. ○ Diseño de Aeronaves del Futuro: Cambridge trabaja en la próxima generación de aeronaves, incluyendo aviones totalmente eléctricos y de hidrógeno. Sus investigaciones se centran en los desafíos tecnológicos para hacer que estas soluciones sean viables a gran escala. Además de la investigación técnica, Cambridge se destaca por su papel en la elaboración de estrategias y políticas para la sostenibilidad. ○ Creación de Hoja de Ruta: La universidad ha publicado un informe clave, "Cinco años para trazar un nuevo futuro para la aviación", que describe una hoja de ruta con cuatro objetivos claros para 2030, que de cumplirse, pondrían al sector en camino de lograr cero emisiones netas para 2050. ○ Colaboración con la Industria: La AIA, liderada por Cambridge, colabora con empresas importantes como Boeing y Rolls-Royce, lo que facilita que la investigación académica se traduzca en soluciones prácticas. Esta colaboración asegura que las innovaciones tecnológicas se implementen en la industria.

Nota. Elaboración propia con información obtenida de Massachusetts Institute Technology (2025) ^a; Stanford University (2025) ^b; Berkeley University (2025) ^c; Tokyo University (2025) ^d; Cambridge University (2025) ^e.

Además de incorporar los principios de sustentabilidad en sus planes y programas de estudio, las universidades arriba citadas, se identificó que contemplan también principios de economía circular a través de la impartición de temas relacionados con diseño circular, nuevos materiales, formación de grupos de trabajo multidisciplinarios, innovación, desarrollos tecnológicos sustentables y el enfoque empresarial de la economía circular, el cual busca nuevos modelos de negocio y *start ups*.

Las investigaciones en materia de economía circular abarcan temas variados y complejos que van desde el reciclaje de materiales hasta la creación de fábricas inteligentes para el reciclaje. Se desarrollan polímeros biodegradables, nuevos materiales para la construcción, materiales biomiméticos, alternativas para la reutilización de aguas residuales, entre otros, los cuales pueden ser de suma utilidad para crear nuevos modelos de negocios, reconfigurar las cadenas de valor o favorecer los encadenamientos productivos, acciones que a largo plazo permitirán minimizar la reducción de residuos y el consumo de recursos naturales.

El análisis realizado a la UNAQ en temas de sustentabilidad y economía circular, dio como resultado que ésta contribuye a la sustentabilidad en la industria aeroespacial principalmente a través de la formación de talento y la investigación aplicada enfocada en la eficiencia operativa, el mantenimiento y la innovación de materiales. (Véase Tabla 3)

Tabla 3

Aportaciones de la UNAQ a los principios de economía circular

Rubro de aportación	Descripción
Diseño y producción circular	A través de la formación de ingenieros y por la interacción que esta universidad mantiene con empresarios y el gobierno, puede influir en la etapa de diseño y producción para que los componentes sean más sostenibles desde su concepción. ○ Investigación en Materiales Avanzados: La universidad puede liderar la investigación en materiales ligeros, como compuestos y aleaciones avanzadas, que no solo reducen el peso de las aeronaves y el consumo de combustible, sino que también son más duraderos y fáciles de reciclar. Esto contribuye a la creación de valor al reducir costos operativos para las aerolíneas y minimizar el impacto ambiental. ○ Diseño para el Desmontaje y Reciclaje: Se pueden desarrollar programas y proyectos que enseñen a los estudiantes a diseñar piezas que puedan ser fácilmente desmontadas al final de su vida útil. Esto facilita la recuperación de materiales valiosos, como metales raros y composites, que de otro modo se perderían. ○ Adopción de Tecnologías de Fabricación Aditiva: La investigación en impresión 3D (manufactura aditiva) permite optimizar el uso de materiales, produciendo piezas más resistentes con menos desperdicio.

Rubro de aportación	Descripción
Mantenimiento, Reparación y Remanufactura (MRO)	El mantenimiento es el pilar de la economía circular en la industria aeronáutica. La UNAQ, ya cuenta con un enfoque en la formación de capital humano en este campo, por lo que podría implementar los siguientes aspectos: ○ Capacitación en MRO Avanzado: Formar a sus egresados en temas relacionados con la remanufactura de los componentes de las aeronaves.
Gestión de Residuos y Simbiosis Industria	La gestión eficiente de los residuos es crucial para completar el ciclo de la economía circular, en este sentido, la UNAQ puede aprovechar su papel como actor estratégico del Aeroclúster de Querétaro para favorecer la interacción entre diferentes stakeholders a través de la promoción de una simbiosis industrial, es decir, facilitar modelos de negocios donde los residuos de una empresa se conviertan en la materia prima de otra. Por ejemplo, los residuos metálicos de una planta de fabricación podrían ser procesados y reutilizados por otra empresa del sector aeroespacial.

Nota. Elaboración propia con información obtenida de la UNAQ (2025)

Aunado a lo anterior, estudios previos muestran que la economía circular requiere más competencias de gestión de recursos y pensamiento sistémico en comparación con el resto de la economía (Janssens et al., 2021). De hecho, estas dos competencias, junto con la producción circular y el diseño de productos, los modelos empresariales circulares, la comunicación en economía circular y la colaboración en economía circular, se definen como la base para el desarrollo de enfoques y planes de estudio de enseñanza y aprendizaje basados en la economía circular (Burger et al., 2019; Giannoccaro et al., 2021; Janssens et al., 2021; Sumter et al., 2021). Además, el marketing ecológico y el conocimiento del mercado, la evaluación del impacto circular, el compromiso circular de los usuarios y los materiales y la fabricación circulares se definen como otras competencias de la economía circular en estudios anteriores (Giannoccaro et al., 2021; Janssens et al., 2021; Sumter et al., 2021).

La enseñanza de la ingeniería con un enfoque en economía circular constituye un elemento clave para la creación de valor en los ámbitos empresarial y social. Al formar profesionales capaces de integrar principios de sostenibilidad en el diseño de productos, procesos y sistemas, se promueve una transformación estructural en la forma en que las organizaciones abordan el uso de recursos, la gestión de residuos y la innovación tecnológica (Bocken et al., 2016). En el ámbito empresarial, esta

formación permite mejorar la eficiencia operativa, reducir costos asociados al consumo de materiales y energía, y desarrollar modelos de negocio sostenibles que respondan a las demandas del mercado y a las exigencias regulatorias (Porter & Kramer, 2011; Kirchherr et al., 2017). Desde una perspectiva social, la ingeniería circular contribuye a la mitigación del impacto ambiental, a la generación de empleo en sectores emergentes y al fortalecimiento de comunidades más resilientes frente a desafíos ecológicos y económicos (Geissdoerfer et al., 2017; Murray et al., 2017). En este sentido, la enseñanza de la ingeniería orientada a la economía circular no solo forma profesionales técnicamente competentes, sino también agentes de cambio capaces de impulsar una transición hacia un modelo de desarrollo más sostenible, inclusivo y competitivo.

Conclusiones

Aunque hacer un cambio de una economía global a una línea no es sencillo y ésta última se encuentra en un proceso de consolidación, formar a las nuevas generaciones con conocimientos integrales que permitan a los egresados facilitar su inserción en el sector laboral, contribuir a la sociedad con proyectos que mitiguen el cambio climático y aprovechen al máximo los recursos naturales así como adquirir habilidades blandas que les permitan trabajar en equipos multi y transdisciplinarios, así como generar nuevos esquemas de negocio que tendrán una repercusión económica a través de la generación de empleos.

Por lo antes descrito, el papel que los docentes desempeñen desde las universidades tiene la capacidad de promover la transición hacia una economía circular a través de actividades educativas curriculares que contemplen el desarrollo de habilidades blandas, el diseño o rediseño de productos, la búsqueda de nuevos materiales y el uso eficiente de los recursos naturales. La formación de ingenieros en economía circular no solo impacta en qué y cómo producen las empresas, sino que también tiene influencia en la sociedad al optimizar el uso de recursos naturales y disminuir o eliminar la generación de desechos.

Crear valor bajo los principios de economía circular, requiere una transformación del pensamiento en los sistemas de producción y consumo, por lo que, la educación es un factor clave para que estos conocimientos permeen en gran parte de la sociedad; en este sentido, la inteligencia artificial es una herramienta clave para acelerar este proceso e incrementar el impacto de los diseños circulares. Cabe señalar que entre los conductores de valor se encuentra la minimización de costos al hacer uso eficiente de los recursos materiales e insumos.

Por ello, para el sector aeronáutico, la formación de personal capacitado en temas de economía circular, puede crear valor al reducir costos, mitigar el impacto mediomambiental y

eventualmente mejorar la calidad de vida de las personas a través de acciones como reducción, reutilización y reciclaje de materiales, desde plásticos de un solo uso en la cabina hasta los componentes metálicos de la aeronave, reutilización y remanufactura de componentes costosos como motores, trenes de aterrizaje y aviónica, lo que implicará un ahorro para líneas aéreas y otros dueños de aeronaves, además, al recuperar materiales valiosos, como aleaciones de titanio o fibras de carbono, la industria disminuye su dependencia de materias primas finitas, lo que mejora la resiliencia de la cadena de suministro.

Referencias

- Berkeley. (2025). *Berkeley Engineering. Aerospace Engineering*.
<https://engineering.berkeley.edu/academics/undergraduate-programs/aerospace-engineering/>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Bordier, R., kirchner, A., Nussbaumer, N. (2011). Adapter la formation de nos ingénieurs à la mondialisation. Institut Montaigne.
https://www.institutmontaigne.org/ressources/pdfs/publications/etude_formation_ingenieurs_mondialisation.pdf revisar la fuente
- Cambridge International University. Aerospace Engineering. <https://ciu-edu.org/?tag=ingenieria-aeroespacial>
- Carbonell-Alcocer, A., Romero-Luis, J., y Gértudix-Barrio, M. (2022). Educating for a sustainable future through the Circular Economy: Citizen involvement and social change. *Comunicar*, 73, XXX. Revista Científica de Educomunicación. ISSN: 1134-3478; e-ISSN: 1988-3293
- Castillo, M.R. Cruz, R.M., Romero, S.R. (2024). Circular economy: a technological innovation strategy for sustainability in air transport. *Mercados y negocios*, 25 (5). DOI: <https://doi.org/10.32870/myn.vi52.7726>
- Castillo M.R. (2024). *Derramas de conocimientos, capacidades dinámicas y escalamiento en la cadena global de valor. Pequeñas y medianas empresas del Aeroclúster de Querétaro*. TESIUNAM.
https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/69C39YN5JIYH8IQD966HUD5GC1275229H8VUEX5M53XIGPRIIP-13518?func=find-b&local_base=TES01&request=ROMINA+CASTILLO+MALAGON+&find_code=WRD

&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=

- Ceschin, F., and I. Gaziulusoy. 2016. "Evolution of Design for Sustainability: From Product Design to Design for System Innovations and Transitions." *Design Studies* 47: 118–163. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.002>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy*. <https://ellenmacarthurfoundation.org>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Artificial Intelligence and the Circular Economy*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/resources>
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *El diagrama de la mariposa: visualizando la economía circular*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>+
- Ellen MacArthur Foundation. (2022). *El ciclo técnico del diagrama de mariposa*. [https://www-ellenmacarthurfoundation-org.translate.goog/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc](https://www.ellenmacarthurfoundation-org.translate.goog/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- Ellen MacArthur Foundation. (2025). *Learning to apply circular economy thinking*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/education-and-learning/overview>
- Espinoza, H. A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. *Revista de Economía Institucional*, 25 (49), 109-134. DOI: <https://doi.org/10.18601/01245996.v25n49.06>
- Fundación para la Economía Circular. (2025). *Economía Circular*. <https://economiacircular.org/economia-circular/>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- López, S. P. (2024). ¿Qué significa realmente eso de día cero por la escasez de agua? *Gaceta UNAM*. <https://www.gaceta.unam.mx/que-significa-realmente-eso-de-dia-cero-por-la-escasez-de-agua/>
- Maija Tiippana-Usvasalo, Nani Pajunen & Holuszko Maria (2023) The role of education in promoting circular economy, *International Journal of Sustainable Engineering*, 16,(1), 92-103, DOI: 10.1080/19397038.2023.2210592
- Massachusetts Institute Technology. (2025). *AeroAstro*. <https://aeroastro.mit.edu>

- Mesa, J. y Esparragoza, I. (2021). Towards the implementation of Circular Economy in Engineering Education: A systematic review. *EEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. ISBN 978-1-6654-3851-3. DOI: 10.1109/FIE49875.2021.9637395
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2018). *Perspectivas Sociales y del Empleo en el Mundo 2018: Sostenibilidad medioambiental con empleo*. ISBN 978-92-2-328541-8
- ONU. (2024). *Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. <https://www.unep.org/es/resources/Global-Resource-Outlook-2024>
- Piloto, C. (2025). Economía circular: beneficios y retos para las empresas e individuos. *MIT. Professional Education*. <https://professionalprograms.mit.edu/es/blog/sostenibilidad/economia-circular/>
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value: How to reinvent capitalism—and unleash a wave of innovation and growth. *Harvard Business Review*, 89(1/2), 62–77.
- Renfors, S.M. (2024). Education for the circular economy in higher education: an overview of the current state. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 25 (9). DOI <https://doi.org/10.1108/IJSHE-07-2023-0270>
- Stanford. (2025). *Aeronautic and Astronautic*. https://aa-stanford-edu.translate.goog/academics-admissions?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Times Higher Education Impact Rankings. (2025). *University sustainability rankings*. <https://www.timeshighereducation.com/impactrankings>
- UNAQ.(2025). *Nosotros*. <https://www.unaq.edu.mx/#>
- UNAQ.(2025). *Sustentabilidad*. <https://www.unaq.edu.mx/#>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Resources Outlook: Bend the trend*.
- University of Tokyo. Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering. <https://www.aerospace.t.u-tokyo.ac.jp/en/>
- WWF. (2024). *Día de la Sobre capacidad de la Tierra*. https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/informe_planeta_vivo_ipv/huella_ecologica/dia_de_la_sobrecapacidad_de_la_tierra/#:~:text=El%20D%C3%AD%20de%20la%20Sobrecapacidad,y%20entrar%20en%20n%C3%BAmeros%20rojos