

3. Transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*



CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ**

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL***

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.03>

Resumen

El transporte aéreo se enfrenta actualmente en la búsqueda de convertirse en un transporte sustentable a largo plazo, ya que todavía mantiene una fuerte dependencia de combustibles fósiles con grandes emisiones contaminantes al medio ambiente. La situación actual presenta desafíos y cambios complejos con relación a la sustentabilidad. Estos cambios en beneficio del medio ambiente son llamados *transiciones sustentables* (ts). La idea central es que las ts implican cambios a largo plazo hacia modos de producción y consumo más sustentables en múltiples dimensiones (social, ambiental y económica). Por lo tanto, el propósito del presente capítulo es analizar la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México. A través del desarrollo de la metodología de estudio

* Capítulo derivado del proyecto de investigación SIP 20254342: "Sistemas de innovación y transiciones sustentables para el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México", patrocinado por el Instituto Politécnico Nacional, México.

** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252> ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

*** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

**** Doctora en Política Pública. Profesora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

de caso y análisis funcional revelaron debilidades dentro de las funciones evaluadas para la adecuada transición sustentable.

Palabras claves: *transiciones sustentables, sustentabilidad, industria aeronáutica, producción y consumo sustentable.*

Introducción

Las transiciones sustentables (TS) tienen como característica central solucionar problemas persistentes con el medio ambiente; las empresas tienen incentivos limitados para abordarlas, porque el objetivo está relacionado con un beneficio económico principalmente, la parte gubernamental, instituciones educativas y organizaciones intermedias juegan un papel clave para llevar a cabo las TS y apoyar las tecnologías pro sustentables (Elzen et al., 2004; Geels, 2024).

Otra característica central se relaciona con los sectores estratégicos para evaluar TS, por ejemplo, el sector transporte, agua, energía y agroindustria. Estos sectores estratégicos se caracterizan por ser abordados por grandes empresas (por ejemplo, compañías petroleras, fabricantes de aeronaves y automóviles, empresas de procesamiento de alimentos, empresas de comercio electrónico, supermercados, cadenas de comida rápida, entre otros) que poseen “activos complementarios” como la capacidad de fabricación especializada, alta investigación en I+D, producción a gran escala, acceso a canales de distribución, redes de servicio y tecnologías complementarias (Geels, 2024).

Sin embargo, la literatura académica y enfoques teóricos emergentes que exploran el análisis de las transiciones sustentables aún permanece en sus primeras etapas; por lo tanto, el presente capítulo tiene como objetivo analizar la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Seguido de la presente introducción, el documento se divide en cuatro secciones: la segunda se enfoca en una revisión teórico-conceptual sobre transiciones sustentables; en la tercera sección, se esboza el diseño metodológico; en la cuarta sección se discuten los principales hallazgos del análisis

funcional de la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México; finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación y bibliografía.

Desarrollo

Transiciones sustentables

La idea central es que las TS implican cambios a largo plazo hacia modos de producción y consumo más sustentables en múltiples dimensiones (social, ambiental y económica). Las TS no sólo implican el desarrollo de innovaciones en productos, procesos y servicios más sustentables, sino también, nuevos mercados, modelos de negocio, prácticas, políticas, infraestructuras y cambios culturales; es decir, las transiciones además de sostener el crecimiento económico también ayuden a proteger el medio ambiente (Geels, 2004, 2024).

Cabe aclarar que el enfoque de TS ha sido investigado recientemente en países desarrollados, principalmente en Europa (Alemania, Reino Unido, Holanda, Francia, Dinamarca, Suiza, Finlandia) (Raven, 2007; Geels, 2024; Truffer et al., 2017), pero para el caso de los países emergentes como México, no se ha identificado este tipo de investigaciones, por lo que es importante avanzar en el conocimiento de la forma en que se generan TS en países emergentes y México, con la complejidad y características que implica el análisis de los SI en estas economías; se hace especial hincapié en comprender y mejorar las estrategias para acelerar la transición hacia energías sustentables, en particular las energías para el transporte aéreo.

La evidencia empírica se centra en el caso de TS hacia energías limpias en el transporte aéreo. El sector aéreo se enfrenta actualmente a grandes desafíos económicos, sociales, ambientales, tecnológicos, entre otros; para abordar tales desafíos el sector se encuentra en la búsqueda de oportunidades para reducir los costos operativos, ganar eficiencia energética y convertirse en un sector sostenible a largo plazo. Se ha argumentado que las actividades derivadas del transporte son la segunda fuente principal de emisiones de CO₂, justo después del sector industrial. El consumo de com-

bustible para aeronaves, por ejemplo, se duplicará entre 2020 y 2040 debido al aumento mundial de los viajes aéreos (IATA, 2023). En este sentido, la industria aeronáutica enfrenta importantes desafíos en sus intentos de mejorar la eficiencia energética, disminuir su dependencia de los fósiles combustibles y reducir sus costos.

Se prevé que el consumo de combustibles para aviones en los países de la OCDE, incluido México, aumente en los próximos años, más del doble para 2040, pasando de 5 billones de BTU en 2015 a 12 billones de BTU (British Thermal Unit). El aumento global también se encuentra fuertemente impulsado por el aumento del consumo en combustibles para aeronaves de China e India. De hecho, el crecimiento de la población en todo el mundo, la necesidad de transporte personal, el desarrollo económico y empresarial son algunos de los principales factores que motivan el consumo de combustible para el transporte aéreo en las próximas décadas (IATA, 2023).

El desarrollo de biocombustibles para aviones ha sido identificado por la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA, por sus siglas en inglés) como la estrategia con mayores ventajas para reducir emisiones de CO₂ en la industria aeronáutica. En este contexto la IATA tiene como objetivo reducir en un 50% las emisiones de carbono que genera la industria en relación con el año base de 2005 (IATA, 2023).

El combustible para aviones convencional (con recursos fósiles) está compuesto por aproximadamente un 20% de parafinas, un 40% de isoparafinas, un 20% de naftenos y un 20% de aromáticos. Esta combinación da al combustible fósil sus propiedades físicas, cuando se quema combustible para aviones, se forman otras emisiones, incluidos óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados (IATA, 2023). Los biocombustibles para aviones pueden proporcionar una solución a corto plazo e incluso a largo plazo para el sector aéreo en forma de un impacto medio ambiental menor que los combustibles fósiles para el sector.

Metodología

Diversos estudios señalan la importancia del estudio de caso como uno de los métodos de investigación cualitativa más usados en las ciencias sociales (Bryman, 2012; Corbin y Strauss, 2015).

Yin (2022) es uno de los principales autores que abordan el método de estudio de caso. Establece que es un método de investigación que estudia un fenómeno contemporáneo en el contexto de la vida real, en especial cuando los límites entre el fenómeno y su contexto no son claramente evidentes.

Yin (2022) indica que una de las principales críticas asociadas a los estudios de caso es que sus conclusiones no son generalizables estadísticamente, sin embargo, los estudios de caso no representan una muestra de un universo concreto, por lo que no se generalizan estadísticamente, sino a proposiciones teóricas, ya que el objetivo del investigador es hacer generalizaciones analíticas y no generalizaciones estadísticas, es así como el propósito del estudio de caso es comprender la interacción entre las distintas partes de un sistema y de las características importantes de éste, de forma que el análisis realizado pueda ser aplicado de manera genérica. Al seleccionar el estudio de caso como método de investigación, se pueden lograr diferentes objetivos: realizar descripciones, hacer explicaciones o interpretaciones, explorar características y hacer evaluaciones sobre el fenómeno que se investiga (Bryman, 2012; Yin, 2022).

La presente investigación consideró el análisis funcional como las variables en estudio que permiten mostrar la transición sustentable evaluada en el presente capítulo.

El análisis a través de funciones enfatiza la importancia de la dinámica de los SI en comparación con cómo está compuesto o estructurado (Jacobsen y Bergek, 2011). Esta orientación se relaciona completamente con las transiciones sustentables en términos de la evolución de una tecnología sustentable emergente como es el caso de biocombustibles en México para la presente investigación. La tabla 3.1 muestra las variables y su definición conceptual para el estudio de caso de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Tabla 3.1. *Representación de las variables y su definición conceptual para la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*

<i>Variables</i>		<i>Definición conceptual</i>
F1	Actividades de emprendimiento	Las actividades empresariales involucran proyectos destinados a demostrar la utilidad de la tecnología emergente en un entorno práctico y/o comercial (Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F2	Desarrollo del conocimiento	Incorpora actividades de aprendizaje, principalmente en la tecnología emergente, en el contexto del desarrollo del SI, esto significa que una intensidad creciente del desarrollo del conocimiento implica un número creciente de opciones disponibles dentro del sistema, en términos de tecnología y también en términos de sus posibles aplicaciones (Hekkert y Negro, 2009).
F3	Difusión del conocimiento	Para que un SI prospere es importante que se produzca la difusión del conocimiento entre agentes del SI. Una forma de aprendizaje interactivo es mediante el uso de tecnologías que implica funciones de aprendizaje basado en las experiencias de los usuarios sobre innovaciones (Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F4	Orientación de la investigación	Hace referencia a la convergencia de señales positivas y negativas —expectativas, promesas, directivas de política— en una dirección particular del desarrollo de una tecnología emergente (Hekkert y Negro, 2009).
F5	Formación de mercado	Hace referencia a la existencia de un mercado potencial para el desarrollo de la tecnología sustentable emergente, e involucra actividades que contribuyen a la creación de dicho mercado (Hekkert y Negro, 2009; Canitez, 2019).
F6	Movilización de recursos	Se refiere a la asignación de capital financiero, material y humano. El acceso a tales factores de capital es necesario para el desarrollo del SI. Las actividades típicas involucradas en esta función del sistema son las inversiones y subsidios (Canitez, 2019; Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F7	Creación de legitimidad	Involucra lobbies políticos y actividades de asesoramiento en nombre de grupos de interés para desarrollar determinada tecnología emergente. La característica principal que distingue esta función es que las coaliciones de defensa buscan legitimidad en una tecnología emergente a través de lobbies y persuasión frente a otros grupos de interés (Canitez, 2019; Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F8	Crecimiento económico	El crecimiento económico es una función que influye en el desarrollo o freno de una tecnología emergente dentro del SI, si bien un mayor crecimiento económico contribuye a más ingresos de un país, una disminución debido a eventos nacionales y/o internacionales también puede propiciar TS (Geels, 2002, 2024).
F9	Política regulatoria	Las políticas regulatorias impulsan el desarrollo de TS en tecnologías emergentes, pero también pueden inhibir su desarrollo, las políticas regulatorias pueden aplicarse a nivel internacional y nacional (Canitez, 2019; Geels, 2024).

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la tabla 3.2 se presentan las variables y su correspondiente indicador, una revisión sistemática de fuentes secundarias (reportes,

bases de datos, documentos oficiales y social media), a través de la herramienta tecnológica Verisk Analytics®.

Tabla 3.2. *Operacionalización de variables para el análisis de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*

<i>Variables</i>		<i>Indicador</i>
F1	Actividades de emprendimiento	Proyectos iniciados y planificados, experimentaciones y actividades de emprendimiento, desarrollo de la cadena de valor de los agentes relacionados con el desarrollo de los biocombustibles en México.
F2	Desarrollo del conocimiento	Proyectos de investigación básica y aplicada en curso, patentes y publicaciones relacionadas con los biocombustibles en México.
F3	Difusión del conocimiento	Número de eventos, congresos y otros foros, análisis de social media relacionada con los biocombustibles en México.
F4	Orientación de la investigación	Expectativas establecidas por los agentes clave del sistema de innovación de biocombustibles en México en términos del desarrollo de la nueva tecnología.
F5	Formación de mercado	Existencia de un mercado potencial para el desarrollo de la nueva tecnología de biocombustibles en México.
F6	Movilización de recursos	Inversión en recursos y políticas para el desarrollo de biocombustibles (recursos humanos, técnicos y financieros).
F7	Creación de legitimidad	Cabildeo político establecido por grupos de influencia para el desarrollo de biocombustibles en México.
F8	Crecimiento económico	Indicadores clave del crecimiento económico en México.
F9	Política regulatoria	Creación de políticas regulatorias que afectan el desarrollo de biocombustibles en México.

Fuente: elaboración propia.

Análisis y resultados

Función 1: Actividades de emprendimiento

De acuerdo con Lovio et al. (2012),

el combustible para motores de aviación de reacción o propulsión a chorro (queroseno o *jet fuel*) se obtiene comúnmente del proceso de refinación del petróleo crudo. La materia prima para su producción corresponde a la segunda fracción (punto de ebullición 205-260 °C) que se produce

de la torre de destilación, la cual se trata con hidrógeno para convertirla en queroseno. (p. 781)

La IATA (2023) señala que “los combustibles alternativos para motores de aviación de reacción o propulsión a chorro se pueden obtener de una variedad de fuentes como el carbón, arenas o esquistos bituminosos, plantas y grasas animales”. Sin embargo, el propósito de producir biocombustibles es contar con combustibles alternativos sustentables que tengan las mismas propiedades que la turbosina para su uso en motores de aeronaves con el fin de reducir las emisiones y la dependencia de los combustibles fósiles (IATA, 2023).

Los cinco componentes clave de la cadena de valor de biocombustibles son los siguientes:

- Sistema de producción de biomasa
- Sistema logístico de biomasa
- Sistema de producción de biocombustible
- Sistema de distribución del biocombustible
- Uso final del biocombustible

Algunas de las principales actividades de emprendimiento para el desarrollo de biocombustibles en México ha sido el cultivo de materias primas para su posterior procesamiento y fabricación como son el aceite de jatropha, el aceite de girasol, el aceite de canola y el aceite de palma.

Existen más de 6 millones de hectáreas de plantaciones de *Jatropha* con potencial para el establecimiento de aproximadamente 2.6 millones de hectáreas (SIAP, 2024). Los estados del país que tienen las mejores condiciones para el cultivo de estos arbustos son Sinaloa, Tamaulipas, Guerrero, Chiapas y Michoacán; una de las principales ventajas es que *Jatropha* puede crecer en condiciones semiáridas o en suelos arenosos con un bajo contenido de nutrientes y casi no necesita suministros adicionales ni regímenes nutricionales especiales.

Función 2: Desarrollo del conocimiento

Para el año 2015, un grupo de organizaciones que colaboran con ASA en el Plan de Vuelo, se agruparon en el clúster de bioturbosina del CEMIE-Bio, iniciativa apoyada por la Sener a través del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, el clúster consorcio de agentes clave del SI de biocombustibles creado para la consolidación de capacidades científico-tecnológico-empresariales, formación de recursos humanos, vinculación y expansión de los biocombustibles en México.

Las acciones realizadas por ASA se conforman en las siguientes fases (ASA, 2024):

- *Primera fase:* se analizó la viabilidad del desarrollo de biocombustibles en México a través del diagnóstico de la cadena de valor y de la producción de un inventario significativo de bioturbosina para llevar a cabo el primer vuelo de demostración en el país.
- *Segunda fase:* la segunda fase incluye el uso de biocombustibles en vuelos comerciales. Durante 2010 y 2011, ASA en colaboración con The Boeing Company realizó el proyecto “Plan de vuelo hacia los biocombustibles sustentables de aviación en México”, iniciativa que logró la integración y el diagnóstico de la cadena de valor de biocombustibles en México (ASA, 2024).

ASA inició un primer ejercicio de producción de biocombustibles, involucrándose a lo largo de toda la cadena de producción, obteniendo semilla proveniente de productores, sometiéndola al proceso de extracción a través de terceros, todo esto logrando generar más de 40 mil litros de biocombustibles (ASA, 2024).

El plan de vuelo se extendió a dos estados del país clave en la producción de materias primas para biocombustibles como son el estado de Hidalgo y Morelos. ASA seleccionó el estado de Hidalgo por la cercanía al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), la refinería de Tula, las áreas potenciales para la instalación de biorefinería, la planta de tratamiento de aguas de Atotonilco, las áreas potenciales de cultivo, los parques industria-

les y la infraestructura carretera. Dentro de las acciones relevantes de este proyecto, se establece (ASA, 2024):

- Realizar estudios y pruebas ingenieriles para obtener el plan de ejecución definitivo de producción de biocombustibles.
- Realizar actividades de desarrollo de infraestructura y adquisición de activos para establecer la cadena de producción y abastecer en un futuro el centro del país, conservando los criterios de sustentabilidad e iniciar producción de biocombustibles en 2025.

Función 3: Difusión del conocimiento

El primero de abril de 2011, como resultado del aprendizaje del plan de vuelo, se realizó el primer vuelo de demostración con un avión comercial. La aeronave Airbus A320 de la aerolínea Interjet, despegó del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) con destino al Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas, este vuelo fue el séptimo a nivel mundial en su categoría y el segundo en Latinoamérica (ASA, 2024).

ASA suministró 4 500 litros de biocombustibles que se utilizaron, por instrucciones del fabricante, solamente en uno de los motores. La materia prima, semilla *jatropha curcas*. La composición de biocombustibles fue 27% y 73% de combustible de origen fósil (ASA, 2024).

El 21 de julio de 2011 se realizaron los primeros vuelos comerciales por la aerolínea Interjet con la ruta Ciudad de México-Tuxtla Gutiérrez-Ciudad de México; la aerolínea consumió alrededor de 7 500 litros de biocombustibles (ASA, 2024).

El 3 de octubre de 2011, a través de una aeronave Airbus 340/600 de la línea aérea Iberia, se realizó un vuelo comercial de la ruta Madrid-Barcelona impulsado con biocombustibles proporcionada por ASA, el vuelo formó parte de la iniciativa española denominada Vuelo Verde, proyecto piloto desarrollado por Iberia y Repsol, el país participó como proveedor del bioenergético, mediante la venta de 10 mil litros de biocombustibles a la compañía petrolera española Repsol (ASA, 2024).

Entre septiembre de 2011 y abril de 2012 Aeroméxico dio inicio al programa de Vuelos Verdes, donde ASA participa como proveedor de biocombustibles utilizada, en este periodo se llevaron a cabo 29 vuelos donde se suministraron un volumen total de 35 825 litros para la ejecución del programa, el vuelo itinerario fue la ruta México-San José de Costa Rica, con el 25% de combustible alternativo (ASA, 2024).

Función 4: Orientación de la investigación

En el año 2015, derivado de la experiencia y aprendizaje del Plan de Vuelo liderado por ASA, se creó una iniciativa apoyada por Sener a través del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, para crear el Clúster de biocombustibles del CEMIE-Bio. El clúster inició operaciones en 2016 y es un proyecto con una duración de cuatro años que busca avanzar en la implementación y desarrollo de biocombustibles en México.

El clúster es un consorcio con dependencia del gobierno, centros de investigación y empresas (agentes del SI) creado para consolidar las capacidades científico-tecnológicas-empresariales, vinculación y desarrollo de biocombustibles en México. El clúster de bioturbosina es liderado por el IPICYT, las principales líneas de investigación que se desarrollan en el clúster son (CEMIE-Bio, 2016):

- Producción y transformación de biomasa
- Sustentabilidad y Análisis del Ciclo de Vida (ACV)
- Transformación de biocombustibles
- Implementación del mercado de biocombustibles

Función 5: Formación de mercado

La industria aeronáutica ha motivado el desarrollo de otros sectores, incluidos el turismo, logística y carga, telecomunicaciones, electrónica e informática, materiales avanzados, biocombustibles, bienes de capital, suministros

de defensa, salvamento y seguridad pública. La producción de aeronaves ha aumentado entre 2004-2005. La figura 66 muestra la orden de venta y el historial de producción de aviones comerciales desde 1981 hasta 2016, periodo durante el cual hubo un aumento del 220% (IATA, 2023).

Utilizando un promedio móvil de siete años, los niveles de producción durante los últimos 20 años han aumentado un 120.5% desde 1996. Durante la próxima década, se prevé que los niveles de producción anual de aviones comerciales aumenten en un 29.3%. Estas cifras son congruentes y están correlacionadas con las cifras de consumo de combustible para aviones proporcionadas por la IATA. En otras palabras, toda la industria y todos los proveedores de la cadena de suministro crecieron significativamente en las últimas dos décadas y se espera que sigan creciendo durante al menos otras dos (IATA, 2023).

Se considera que América Latina tiene buenas perspectivas de desarrollo de la industria aeronáutica. La industria está liderada por Brasil, México, Panamá, Chile, Colombia y Perú, que han mostrado un buen desempeño en los indicadores económicos y se están expandiendo, generando nuevas rutas, aumentando la demanda de aeronaves e impulsando los mercados internos. Se proyecta que la flota comercial de la región se duplique entre 2015 y 2035, de casi 1 550 aviones a más de 3 600 (IATA, 2023).

Además, la región se considera estratégica para el desarrollo de la industria aeronáutica debido a las inversiones en la industria, la creciente demanda y los desarrollos en infraestructura, que incluyen nuevos aeropuertos y adquisición de aeronaves en toda la región. Con relación al mercado interno, en 2018 los pasajeros transportados por vía aérea marcaron un máximo histórico al llegar a 97.3 millones de pasajeros, lo anterior representa un incremento del 7.6% con respecto a 2017, donde se transportaron 90.5 millones de pasajeros (SCT, 2018).

Función 6: Movilización de recursos

En 2012 se creó el Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética durante la administración 2012-2018, de acuerdo a la Sener (2018) el propósito del Fondo “es el financiamiento de investigaciones

científicas, desarrollo tecnológico, innovación, el registro nacional o internacional de propiedad intelectual, formación de recursos humanos especializados, becas, creación, fortalecimiento de grupos o cuerpos académicos o profesionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación”.

El 20 de diciembre de 2013 se promulgó la reforma constitucional en materia energética, que modifica los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política, y permitió dar un giro positivo al sector mexicano de energía; entre sus principales objetivos encontramos (Sener, 2018):

- Modernizar y fortalecer a Petróleos Mexicanos (Pemex) y a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como empresas productivas del Estado.
- Reducir la exposición del país a los riesgos financieros, geológicos y ambientales en las actividades de exploración y extracción de petróleo y gas natural.

En 2014, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria (LFPRH) y de la Ley General de Deuda Pública. Con esta reforma, los artículos 88 y 89 de la LFPRH constituyen el actual fundamento jurídico del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, el fondo de mayor financiamiento a energías renovables, donde se logró el financiamiento por parte del Estado para el desarrollo de biocombustibles en México (DOF, 2014).

Dentro de los proyectos más importantes financiados por el Fondo se encuentran los centros mexicanos de innovación en energía (CEMIE) que contribuyen al desarrollo del sector energético para ayudar a que, en el futuro, México cuente con un mayor número de fuentes de energía. Cada uno de estos centros (bio, eólico, geotérmico, océano y solar) han desarrollado una planeación científico-tecnológica de mediano y largo plazo y cuentan con diversas líneas estratégicas de investigación. Operan de forma autónoma y sin un espacio físico, toda vez que están integrados por más de 120 instituciones, centros de investigación, empresas y entidades gubernamentales y expertos en distintas ramas de las energías renovables, coordinados

cada uno por un grupo directivo propio y diversos comités de evaluación, monitoreo y seguimiento (Sener, 2018).

Para el caso de los biocombustibles destaca el Clúster de Bioturbosina del CEMIE-Bio un proyecto que inició operaciones en 2016 con una duración de cuatro años, al Fondo se le asignó un presupuesto aproximado de 380 millones de pesos.

Función 7: Creación de legitimidad

Como se mencionó en la Función 6 (Movilización de recursos), en 2012 se creó el Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética durante la administración de gobierno (2012-2018). El Fondo apoya el desarrollo de energías sustentables, dentro de la cuales se encuentra el desarrollo de biocombustibles en México con proyectos financiados con fondos públicos (Sener, 2018).

Dentro de los proyectos más importantes financiados por el Fondo se encuentran los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE) que contribuyen al desarrollo del sector energético para ayudar a que, en el futuro, México cuente con un mayor número de fuentes de energía. Derivado de los CEMIE, se crea el Clúster de Bioturbosina del CEMIE-Bio un proyecto que inició operaciones en 2016 con una duración de cuatro años, al Fondo se le asignó un presupuesto aproximado de 380 millones de pesos (Sener, 2018).

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) es el documento de planeación clave para establecer las prioridades nacionales en materia de política pública. El PND 2019-2024 tiene como objetivo general “Transformar la vida pública del país para lograr un mayor bienestar para todos”. El PND (2019) tiene tres ejes rectores:

- *Justicia y estado de derecho*: políticas para garantizar la construcción de la paz, el pleno ejercicio de los derechos humanos, la gobernanza democrática y el fortalecimiento de las instituciones políticas de México.

- *Bienestar*: políticas para garantizar el ejercicio efectivo de los derechos económicos, sociales, culturales y ambientales, con énfasis en la reducción de la desigualdad y las condiciones de vulnerabilidad de las poblaciones y territorios.
- *Desarrollo económico*: políticas dirigidas a aumentar la productividad y promover un uso eficiente y responsable de los recursos para contribuir a un crecimiento económico equilibrado que garantice un desarrollo equitativo, incluyente y sostenible en todo el territorio.

Función 8: Crecimiento económico

De acuerdo con el estudio de la OCDE (2019),

la riqueza petrolera, el crecimiento de la población en edad productiva, el libre comercio y las políticas de inversión han sustentado el crecimiento moderado de las últimas dos décadas [...]. La producción de petróleo ha ido en descenso: en la última década bajó de 9% a 4% del PIB y de 16% a 6% del total de exportaciones. (p. 19)

Respecto al Reporte de Competitividad Global 2021 desarrollado por el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), éste menciona que las tensiones comerciales e incertidumbre derivadas de la política comercial internacional de Estados Unidos constituyen un viento en contra que impiden el desarrollo socioeconómico de México, reduciendo las expectativas de los líderes empresariales y, en consecuencia, su disposición a invertir. Con relación a los indicadores clave, en términos de habilidades, el nivel educativo aún es bajo (8.6 años en promedio, lugar 84 del Reporte) y los planes de estudio no están actualizados (habilidades digitales, lugar 99 y pensamiento crítico, lugar 103). Asimismo, las mejoras en las instituciones se han concentrado en la eficiencia administrativa del sector público (+4.5 puntos respecto al reporte de 2018, lugar 59), mientras que la seguridad (lugar 138) y la transparencia (lugar 116) siguen siendo problemáticos; además hay algunas áreas donde el desempeño disminuye, la inflación, por ejemplo, ha aumentado (5.5%, lugar 111), la esperanza de vida saludable se

ha reducido en 0.9 años (lugar 60) y la falta de mejoras en la infraestructura de transporte (lugar 51) requiere más esfuerzos para acercar la competitividad de México a las economías mejor clasificadas (WEF, 2021).

Función 9: Política regulatoria

El Gobierno de México decretó en febrero del año 2008, la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos (DOF, 2008).

En el marco de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB), Capítulo II, artículo 8, se crea la Comisión Intersecretarial de Bioenergéticos, integrada por los titulares de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), Secretaría de Energía (Sener), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Secretaría de Economía (SE) y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP).

En el mes de diciembre de 2015, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley de Transición Energética (LTE) con la que se definen las bases legales para impulsar una transformación hacia un modelo energético y económico sustentable en el largo plazo (DOF, 2015).

Por su parte, de acuerdo con información emitida por el DOF (2015),

la Ley de Transición Energética (LTE) tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. (p. 1)

El Consejo Consultivo para la Transición Energética, en su sesión celebrada el 27 de noviembre de 2019, emitió diversas opiniones y recomendaciones con objeto de coadyuvar en la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, mismas que fueron tomadas en consideración por la Secretaría de Energía. La Sener aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en tér-

minos de la Ley de Transición Energética. El presente Acuerdo entró en vigor el 17 de enero de 2020, el día de su publicación en el DOF (2019).

Conclusiones

El análisis funcional, permite mapear la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México para el monitoreo iterativo de los eventos clave extraídos principalmente de informes, documentos oficiales, bases de datos y social media, para ello se utilizó la herramienta tecnológica Verisk Analytics®.

Las lecciones empíricas derivadas de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México revelaron debilidades dentro de las funciones evaluadas para la adecuada transición sustentable. Se deben fomentar cada una de las funciones clave con proyectos a largo plazo con la colaboración y consenso de los agentes clave del sistema de innovación de biocombustibles en el país, la política pública juega un papel fundamental para el desarrollo y consolidación de la transición sustentable, sin embargo, actualmente no existen políticas públicas, ni incentivos para el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Referencias

- Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). (2024, 10 de noviembre). *Biocombustibles sustentables de aviación en México*. http://bioturbosina.asa.gob.mx/es_mx/BIOturbosina/Plan_de_Vuelo_Nacional
- Bruno, M. (2022). Cycling and transitions theories: A conceptual framework to assess the relationship between cycling innovations and sustainability goals. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 15, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100642>
- Bryman, A. (2012). *Social research methods* (4ª ed.). Oxford University.
- Canitez, P. (2019). A socio-technical transition framework for introducing cycling in developing megacities: The case of Istanbul. *Cities*, 94, 172-185. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.006>
- CEMIE-Bio. (2016). *Clúster Bioturbosina: Anexo III: Plan General del Clúster Bioturbosina*.

- Corbin, J. y Strauss, A. (2015). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (4ª ed.). Thousand Oaks.
- Diario Oficial de la Federación. (2008a). *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*.
- Diario Oficial de la Federación. (2008b). *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*.
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Ley de Transición Energética*.
- Diario Oficial de la Federación. (2016). *Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios*.
- Diario Oficial de la Federación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2020*.
- Elzen, B., Geels, F. W. y Green, K. (2004). *System innovation and sustainability transitions: Theory, evidence and policy*. Edward Elgar.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31, 1257-74. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F. W. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy* 33 (6-7), 897-920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>
- Geels, F. W. (2005). Co-evolution of technology and society: The transition in water supply and personal hygiene in the Netherlands (1850-1930): A case study in multi-level perspective. *Technology in Society*, 27(3), 363-397. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.04.008>
- Geels, F. W. (2014). Regime resistance against low-carbon transitions: Introducing politics and power into the multi-level perspective. *Theory Culture & Society*, 31(5), 21-40. <https://doi.org/10.1177/0263276414531627>
- Geels, F. W. (2024). *Advanced introduction to sustainability transitions*. Edward Elgar.
- Geels, F. W. y Schot, J. W. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399-417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Hekkert, M. y Negro, S. (2009). Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims. *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 584-594.
- International Air Transport Association (IATA). (2025, 5 de abril). *Annual Review 2023*. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf>
- Jacobsson, S. y Bergek, A. (2011). Innovation system analyses and sustainability transitions: Contributions and suggestions for research. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 41-57.
- Lovio, R. y Kivimaa, P. (2012). Comparing alternative path creation frameworks in the context of emerging biofuel fields in the Netherlands, Sweden and Finland. *European Planning Studies*, 20(5), 773-790.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2019, mayo). *Estudios económicos de la OCDE: México 2019* [Reporte]. <https://doi.org/10.1787/fde7bbbe-es>

- Raven, R. (2007). Co-evolution of waste and electricity regimes: Multi-regime dynamics in the Netherlands (1969-2003). *Energy Policy*, 35(4), 2197-2208.
- Secretaría de Energía (Sener). (2024, 9 de abril). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024, 3 de octubre). Gobierno de México.
- Truffer, B., Schippl, J y Fleischer, T. (2017). Decentering technology in technology assessment: Prospects for socio-technical transitions in electric mobility in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, 122(1), 34-48.
- World Economic Forum (WEF). (2021). *The global competitiveness report 2021*.
- Yin, R. (2022). *Case study research: Design and methods* (2ª ed.). Sage.