

Trayectorias coevolutivas de la electromovilidad y la Industria 4.0 en la Twin Transition: un análisis en cinco fases

Co-evolutionary trajectories of electromobility and Industry 4.0 in the Twin Transition: a five-phases analysis

Adriana Martínez Martínez^{1*}, Alejandro García Garnica², Estefanía Anguiano Lara¹

¹ Economía Industrial/ Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad León/Universidad Nacional Autónoma de México. León, Guanajuato, CP. 37684, Tel. 477 1940800 ext. 43366. adriana.martinez@enes.unam.mx

² Facultad de Estudios Superiores/Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Electromovilidad;
Industria 4.0;
coevolución
tecnológica;
transición gemela.

Este artículo analiza la coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0 en el sector automotriz y propone un marco interpretativo de cinco fases que sintetiza sus trayectorias tecnológicas, regulatorias y de mercado. A partir de una revisión estructurada de la literatura científica y gris publicada entre 2010 y 2024, se desarrolla un análisis temático cualitativo con el fin de identificar los principales hitos de esta transformación dual, digital y sostenible, en el sector automotriz. Los hallazgos muestran que la articulación entre la electrificación vehicular y la Industria 4.0 responde a una dinámica coevolutiva impulsada por políticas públicas, procesos de innovación, reconfiguración productiva y nuevos modelos de negocio. Asimismo, se identifican tensiones estructurales y desafíos para países emergentes como México. El artículo contribuye al debate académico al ofrecer una periodización analítica útil para estudios comparados y una base conceptual para repensar las políticas en el contexto de la *twin transition*.

Abstract

Keywords:

Electromobility;
Industry 4.0;
technological
coevolution; twin
transition.

This article analyzes the coevolution of electromobility and Industry 4.0 in the automotive sector and proposes a five-phase interpretive framework to synthesize their technological, regulatory, and market trajectories. Based on a structured review of scientific and grey literature published between 2010 and 2024, the study develops a qualitative thematic analysis to identify the main milestones of this dual transformation, both digital and sustainable, in the automotive sector. The findings show that the articulation between vehicle electrification and Industry 4.0 follows a coevolutionary dynamic driven by public policies, innovation processes, productive reconfiguration, and new business models. The article also identifies structural tensions and challenges for emerging economies such as Mexico. It contributes to the academic debate by offering an analytical periodization useful for comparative studies and a conceptual basis for rethinking policies in the context of the twin transition.

Recibido: 27 de mayo de 2025

Aceptado: 03 de febrero de 2026

Publicado: 01 de julio de 2026

Cómo citar: Martínez, A.; García, A.; & Anguiano, E. (2026). Trayectorias coevolutivas de la electromovilidad y la Industria 4.0 en la Twin Transition: un análisis en cinco fases. *Acta Universitaria*, 36, e4657. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4657>

Introducción

El avance tecnológico ha sido un factor determinante en la transformación de los sectores industriales. En este contexto, la electromovilidad y la Industria 4.0 han emergido como fuerzas complementarias que están reconfigurando la industria automotriz a escala global. La electromovilidad¹ se refiere al desarrollo y adopción de vehículos eléctricos (VE) y de tecnologías asociadas (como baterías recargables, motores eléctricos, e infraestructura de carga), orientadas a reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones contaminantes. Por su parte, la Industria 4.0 integra tecnologías digitales con sistemas físicos, transformando los procesos de manufactura a través de la interconexión, la automatización, el intercambio de datos y el análisis en tiempo real (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2023; Cugno *et al.*, 2022; Zhang & Sun, 2024). Tanto la electrificación del transporte como la manufactura inteligente son impulsadas por objetivos comunes, entre los que destacan la sostenibilidad ambiental, la eficiencia económica y la transformación tecnológica de la movilidad.

Autores como, Van Audenhove *et al.* (2024) mencionan que la expansión de la electromovilidad está siendo impulsada por cambios en el comportamiento de los consumidores, así como por transformaciones tecnológicas y de mercado que reconfiguran la oferta de servicios de movilidad. A ello se suma una creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente, el bienestar y la calidad de vida, junto con la emergencia de nuevas prácticas asociadas a la economía colaborativa en el uso del transporte.

En términos de las tendencias tecnológicas y de mercado se observa lo siguiente. Los servicios de movilidad se han elevado con la conectividad digital; están surgiendo nuevas fuentes de energía alternas al petróleo y la inteligencia artificial está facilitando el diseño y producción de vehículos autónomos (Van Audenhove *et al.*, 2024). Estas tendencias adquieren mayor relevancia si se considera que los recursos energéticos fósiles son finitos y no renovables, por lo que su disponibilidad futura está sujeta a restricciones físicas, tecnológicas y económicas. Diversos estudios han advertido que, de mantenerse patrones elevados de consumo, las reservas de petróleo podrían enfrentar escenarios de agotamiento o restricciones crecientes en las próximas décadas (Bentley *et al.*, 2007; Shafiee & Topal, 2009).

En este contexto, las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 desempeñan un papel clave en el desarrollo de la electromovilidad. En particular, contribuyen al diseño, fabricación y desempeño de dispositivos electroquímicos fundamentales para las baterías y las pilas de combustible (Zhang & Sun, 2024). Asimismo, la integración de redes inteligentes y sistemas ciberfísicos permite avanzar en la gestión eficiente de la energía y en el monitoreo en tiempo real de la infraestructura necesaria para la movilidad eléctrica (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2023; Cugno *et al.*, 2022). Desde la perspectiva competitiva, tanto los proveedores como los ensambladores del sector automotriz dependen crecientemente del desarrollo y la adopción de tecnologías 4.0 para sostener su posición en un entorno de cambio acelerado (Aboagye *et al.*, 2017).

¹ La electromovilidad alude, en términos genéricos, a cualquier tipo de vehículo terrestre que se mueve a través de la electricidad, abarca, vehículos ligeros, trolebuses, camiones, motos, scooters, bicicletas, pero en este artículo, solo tomaremos a los vehículos ligeros eléctricos (García, 2019; Chinoracky, *et al.*, 2022; Sandén *et al.*, 2013). Respecto a los autos eléctricos a considerar, según su funcionamiento, son: los *vehículos eléctricos* en cuanto a tal, estos no generan emisiones tóxicas y para recargarse usan baterías que solo requieren de electricidad; *híbridos enchufables*, su motor funciona a partir de un motor eléctrico que al agotarse usa otro alternativo de gasolina; *híbridos convencionales*, estos también integran dos motores, uno eléctrico y otro de gasolina, pero a diferencia de los enchufables, en este caso la batería eléctrica no se recarga en la estación de carga, sino mediante el uso del propio auto; los *eléctricos con pilas de combustible*, estos usan un motor eléctrico que funciona con hidrógeno; y los de pila de combustible-hidrógeno que usan solamente este componente químico para generar energía eléctrica (KPN Energy, 2022; Linares, 2023).

Si bien existe una literatura amplia que analiza, por un lado, el desarrollo de la electromovilidad y, por otro, la adopción de tecnologías vinculadas a la Industria 4.0, los estudios que abordan de manera integrada la relación entre ambas trayectorias siguen siendo limitados. En particular, son escasos los trabajos que examinan esta relación desde una perspectiva coevolutiva, capaz de identificar fases, interacciones dinámicas y tensiones estructurales entre la electrificación vehicular, la digitalización industrial y los cambios regulatorios y de mercado. Este vacío analítico dificulta la comprensión de la transformación sistémica que enfrenta actualmente la industria automotriz.

Partiendo de esta problemática, el objetivo del artículo es analizar la coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0 a partir de una revisión estructurada de la literatura científica y de la literatura gris publicada entre 2010 y 2024, con el fin de identificar hitos clave, trayectorias tecnológicas, dinámicas de mercado y marcos regulatorios asociados, y así comprender las sinergias y los desafíos emergentes en el avance hacia la *twin transition*. Con base en este objetivo, el estudio se articula en torno a tres preguntas de investigación: ¿qué tipos de interacciones pueden observarse entre la Industria 4.0 y la electromovilidad a lo largo de la evolución de los vehículos eléctricos?, ¿qué fases caracterizan la coevolución de estas dos trayectorias?, y ¿qué desafíos enfrenta actualmente este proceso desde las perspectivas tecnológica, regulatoria y de mercado?

El análisis parte de la premisa de que existe un proceso de coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0 que se desarrolla en fases diferenciadas, determinadas por la convergencia progresiva de tecnologías digitales, condiciones de mercado y políticas públicas, que en conjunto han redefinido la trayectoria de la industria automotriz contemporánea. En un contexto de disrupción simultánea –digital, ambiental y productiva–, comprender esta coevolución no constituye únicamente un ejercicio académico, sino una necesidad estratégica para anticipar riesgos, orientar políticas y repensar la gobernanza industrial. Este artículo propone un marco interpretativo de cinco fases como una contribución analítica para el estudio de la transformación contemporánea del sector automotriz.

El artículo está estructurado en cuatro secciones, además de esta introducción. En la segunda sección se discuten los principales conceptos teóricos: innovación, aprendizaje, capacidades organizacionales, coevolución y trayectorias, y paradigmas tecnológicos. La tercera sección presenta el diseño metodológico de la revisión de la literatura. Los resultados se desarrollan en dos secciones posteriores; la primera analiza los principales hitos tecnológicos y de mercado asociados a la electromovilidad y a la Industria 4.0, mientras que la segunda reconstruye la trayectoria tecnológica y de mercado de su coevolución. Finalmente, la sección de conclusiones sintetiza los principales aportes del estudio y sugiere líneas futuras de investigación.

La interacción conceptual entre innovación, coevolución y trayectorias tecnológicas

Con el fin de organizar la exposición de las categorías conceptuales centrales del estudio, este apartado se estructura en dos secciones.

Innovación, aprendizaje y capacidades organizacionales

La innovación es uno de los procesos más dinámicos del sistema capitalista y se asocia a dinámicas de destrucción y creación continua de nuevos bienes y servicios, al surgimiento de nuevos mercados, a nuevas formas de acceso a materias primas y a distintas configuraciones organizativas (Schumpeter, 1978). El proceso de innovación rara vez es lineal; por el contrario, suele ser complejo, incierto y no completamente determinado. Generalmente se inicia a partir de la generación de una idea que da lugar al desarrollo de diseños y prototipos, los cuales se materializan en bienes o servicios que son posteriormente puestos a prueba en el mercado en términos de su capacidad para generar valor.

La innovación abarca múltiples etapas e involucra a diversos actores, entre los que se encuentran gobiernos, universidades, centros de investigación, institutos tecnológicos y empresas (Delgado-Fernández, 2024). Desde una perspectiva institucional, la Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2018) define la innovación como “un producto o proceso nuevo o mejorado (o una combinación de ambos) que difiere significativamente de los productos o procesos previos de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales”.

Biondi & Galli (1992) advierten sobre la frecuente confusión entre innovación y tecnología. Mientras que las tecnologías remiten a la aplicación de conocimientos conceptuales y prácticos –materializados en productos o procesos–, la innovación supone mejoras cualitativas que son validadas por el mercado. Bajo este enfoque, la innovación puede entenderse como un proceso evolutivo que surge del aprendizaje acumulado por las empresas.

Johnson & Lundvall (1994) sostienen que la innovación es un proceso evolutivo basado en el aprendizaje colectivo, resultado de la interacción entre actores y la integración de múltiples formas de conocimiento. En una economía del aprendizaje, la capacidad de adquirir y aplicar nuevos conocimientos se convierte en un factor clave para el éxito económico.

Las innovaciones pueden clasificarse en incrementales, disruptivas o radicales. Las innovaciones incrementales se asocian con mejoras o modificaciones graduales en productos o procesos existentes, como ocurre con las sucesivas versiones de dispositivos tecnológicos consolidados, por ejemplo, el iPhone (OECD, 2018; Varón *et al.*, 2017). Las innovaciones disruptivas, por su parte, transforman los mercados al introducir productos o servicios que inicialmente pueden parecer más simples o de menor rendimiento, pero que terminan desplazando a las tecnologías dominantes. Un ejemplo representativo es el desarrollo de las plataformas de *streaming* frente a la televisión tradicional (Christensen, 1997; Machuca-Contreras *et al.*, 2023). Finalmente, las innovaciones radicales implican la creación de tecnologías, productos o modelos de negocio completamente nuevos, dando lugar a mercados o industrias que no existían previamente, como ocurrió con la aparición del ordenador personal o, más recientemente, con el desarrollo de la inteligencia artificial (Bower & Christensen, 1995; OECD, 2018).

Por su parte, Helpman & Grossman (1993), así como Altenburg (2009), señalan que los procesos de innovación favorecen el desempeño de empresas, naciones y regiones, al incrementar el contenido tecnológico y la calidad de los productos y servicios, lo que se traduce en la generación de riqueza económica y en mayores niveles de competitividad. No obstante, desde una perspectiva evolutiva, Nelson & Winter (1982) sostienen que las empresas constituyen los principales espacios de creación de innovación, en tanto son las organizaciones que asimilan, acumulan y se apropian de distintos conocimientos y capacidades, orientándolos al logro de sus objetivos, entre los que se encuentra el incremento de las utilidades.

En este proceso, las rutinas organizacionales desempeñan un papel central. Estas pueden entenderse como patrones de acción relativamente estables que permiten la acumulación de aprendizaje a partir del conocimiento y de las experiencias compartidas socialmente (Levitt & March, 1988). A través de ellas se fomenta el aprendizaje organizacional, el cual, a su vez, impulsa tanto la eficiencia como la capacidad innovadora de las empresas (Dodgson, 1993). En esta misma línea, Nonaka & Takeuchi (1999) sostienen que el aprendizaje organizacional implica procesos continuos de creación, combinación, aplicación y transferencia de conocimiento a lo largo de toda la estructura organizacional.

Bajo este marco analítico, las capacidades de innovación adquieren especial relevancia, en tanto comprenden el conjunto de conocimientos, habilidades, rutinas, recursos y procesos esenciales para la competitividad de las organizaciones (Da Silva & Zawislak, 2023). Estas capacidades no solo explican por qué las empresas difieren en sus modelos de negocio, niveles de rentabilidad o capacidad de adaptación al cambio (Rodríguez & Quintero, 2022), sino que también se manifiestan en los ámbitos operativo, comercial, administrativo y tecnológico (Zhang & Li, 2025). Además, en la actualidad, las organizaciones requieren capacidades específicas para gestionar la información tecnológica, administrar el conocimiento y coordinar de manera eficiente tanto los recursos humanos como los técnicos (Da Silva & Zawislak, 2023).

Coevolución, trayectorias y paradigmas tecnológicos

La innovación no se desarrolla de manera aislada al interior de las organizaciones, sino que requiere una interacción constante con el entorno externo. Este proceso implica articular las capacidades internas de las empresas con conocimientos, recursos y señales que provienen de clientes, proveedores, competidores, universidades y otros actores relevantes del sistema de innovación (Benézéch, 2011). En esta línea, Nooteboom (2000) sostiene que la colaboración externa favorece el aprendizaje interorganizacional y contribuye al fortalecimiento de las capacidades innovadoras, al ampliar la base cognitiva y reducir la incertidumbre asociada a los procesos de cambio tecnológico.

Desde esta perspectiva, las empresas no son sistemas cerrados, sino entidades abiertas que evolucionan a través de la interacción con instituciones y actores del entorno. Este proceso de retroalimentación mutua conduce a la coevolución: la transformación de una tecnología o actor influye en otros, generando ajustes recíprocos a lo largo de una trayectoria compartida (Franco *et al.*, 2018; Zhang, 2020). Lynskey (2006) enfatiza que los vínculos entre organizaciones e instituciones permiten el surgimiento de nuevas formas de coordinación, conocimiento y tecnologías.

La coevolución en los sistemas tecnológicos puede entenderse como un proceso en el que dos o más tecnologías se desarrollan en relación mutua, generando avances que no podrían haberse logrado de manera independiente (Geels, 2002). En esta contribución se analizará cómo la Industria 4.0 ha facilitado el desarrollo de la electromovilidad y viceversa.

Von Tunzelmann (2003) amplía este concepto a las estructuras de gobernanza, argumentando que la evolución tecnológica se alinea con los cambios en la gestión del conocimiento, los procesos de toma de decisiones, los incentivos y los marcos institucionales. Esto significa que cada revolución tecnológica coevoluciona con un modelo específico de gobernanza, redefiniendo cómo se distribuyen los excedentes y cómo operan los mecanismos de coordinación.

Más recientemente, Ciarli *et al.* (2021) identifican una forma adicional de coevolución que vincula las tecnologías digitales, las habilidades laborales y los procesos de innovación. Este tipo de dinámica coevolutiva se acompaña de reorganizaciones en los roles, tareas y rutinas organizacionales, así como de la emergencia de nuevas formas de aprendizaje y de desarrollo de capacidades.

Todos estos procesos coevolutivos se desarrollan dentro de un paradigma tecnológico específico (Cimoli & Dosi, 1994), entendido como un conjunto de modelos cognitivos, organizativos y sociales que orientan la forma en que las sociedades abordan y resuelven problemas tecnológicos en un contexto histórico determinado.

Desde una perspectiva tecnoeconómica, Pérez (2005) identifica cinco grandes revoluciones tecnológicas - desde la mecanización textil hasta la era digital -, cada una de ellas asociada a paradigmas diferenciados, definidos por combinaciones específicas de prácticas técnicas, organizativas y patrones de inversión que resultan exitosos en determinados periodos históricos. Estos paradigmas, a su vez, delimitan trayectorias tecnológicas dominantes que condicionan los procesos de innovación y difusión tecnológica.

Dichas trayectorias reflejan la dirección que sigue una tecnología basada en el conocimiento disponible, las capacidades acumuladas y las condiciones del mercado. Biondi & Galli (1992) explican que estas trayectorias influyen en los costos, la segmentación del mercado y los ciclos de vida de los productos. Jasso (2004) añade que también están moldeadas por la disponibilidad de recursos humanos y técnicos en el entorno. Según Souitaris (2002), estas trayectorias determinan el desempeño innovador de las empresas, el cual varía entre sectores dependiendo de factores estratégicos, redes de conocimiento y condiciones del mercado.

Desde esta perspectiva, la coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0 puede analizarse como una trayectoria tecnológica compartida, configurada por avances interdependientes en procesos, productos y capacidades, articulados dentro de un marco más amplio de gobernanza y sostenibilidad.

Materiales y métodos

Este estudio se basa en una revisión estructurada de la literatura científica y de la literatura gris, con el propósito de identificar y analizar los principales hitos en la evolución tecnológica, de mercado y regulatoria de la electromovilidad y la Industria 4.0, así como las interacciones entre ambas trayectorias. A partir de esta revisión, se desarrolló un análisis temático cualitativo en el que la identificación de dichos hitos constituyó un criterio central, lo que permitió trazar trayectorias coevolutivas y reconocer momentos de inflexión relevantes en el proceso de transformación industrial.

Las fuentes de información incluyeron bases de datos científicas de amplio reconocimiento, como ScienceDirect, ProQuest, JSTOR, Google Scholar, Dialnet y ResearchGate. Además, se revisaron informes y documentos de organizaciones internacionales (por ejemplo, Agencia Internacional de Energía [AIE], Foro Económico Mundial [FEM], Comisión Europea [*European Commission*]), así como plataformas especializadas en movilidad eléctrica e Industria 4.0. Esta combinación permitió integrar aportes académicos, documentos de política pública e informes industriales relevantes para el objeto de estudio.

Periodo de búsqueda y criterios temáticos

El periodo de búsqueda abarcó de 2010 a febrero de 2025. Esta delimitación temporal se justifica porque 2010 marcó un punto de inflexión en la comercialización de los vehículos eléctricos (VE), con el lanzamiento del Nissan Leaf y el Chevrolet Volt durante el Auto Show de Detroit (ExpokNews, 2010). A partir de ese momento, los avances en baterías de iones de litio, las estrategias de descarbonización y la integración de tecnologías digitales impulsaron un crecimiento sostenido tanto del mercado de la electromovilidad como de la producción científica asociada. No obstante, hasta la fecha, son escasos los estudios que han abordado de manera explícita la coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0, lo que refuerza la pertinencia del enfoque adoptado en este trabajo.

La revisión de la literatura científica se organizó en torno a tres ejes temáticos: (1) la evolución tecnológica de los vehículos eléctricos (VE); (2) la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en el sector automotriz; y (3) la convergencia entre sostenibilidad, digitalización e innovación industrial.

La estrategia de búsqueda incluyó el uso de palabras clave en inglés, entre las que se encuentran: "co-evolution of electromobility and Industry 4.0", "electromobility technological evolution", "smart manufacturing in the automotive sector" y "twin transition in the automotive industry".

A partir del análisis de los estudios seleccionados, se identificaron patrones recurrentes y momentos de convergencia tecnológica y de mercado que permitieron reconstruir una trayectoria compartida entre la electromovilidad y la Industria 4.0. Si bien los procesos evolutivos de ambas trayectorias no han sido completamente paralelos, estos puntos de convergencia evidencian dinámicas coevolutivas que sirven de base para la identificación de las cinco fases analizadas en la sección de resultados.

El análisis adopta como referencia contextual el periodo previo a 1970 y se extiende hasta la actualidad, incorporando los avances más recientes en automatización, inteligencia artificial, regulación ambiental e infraestructura energética. Esta perspectiva de largo plazo permite comprender la transformación de la industria automotriz, no como la suma de tendencias independientes, sino como un proceso sistémico de doble transición – digital y sostenible –, enmarcado en la emergencia de un nuevo paradigma industrial.

Criterios de inclusión y de exclusión

La selección de las fuentes se realizó con base en criterios de inclusión y exclusión orientados a asegurar la pertinencia y coherencia del análisis. Se incluyeron artículos académicos, libros, capítulos y literatura gris provenientes de organismos internacionales, consultoras y plataformas especializadas, siempre que abordaran de manera explícita la electromovilidad, la Industria 4.0, sus trayectorias tecnológicas o sus interacciones desde una perspectiva evolutiva, sectorial o sistémica. Se excluyeron documentos de carácter estrictamente descriptivo, notas periodísticas sin sustento analítico, duplicados y estudios que, aun siendo relevantes para alguno de los dos campos, no ofrecieran elementos para analizar procesos de convergencia o coevolución tecnológica.

Resultados

Hitos tecnológicos y de mercado en la evolución de la electromovilidad e Industria 4.0

Avances tecnológicos: baterías, digitalización y automatización

La evolución de la electromovilidad ha estado estrechamente vinculada al desarrollo de tecnologías clave como las baterías, la propulsión eléctrica, la conectividad vehicular y los sistemas inteligentes de gestión energética. Aunque los primeros prototipos de vehículos eléctricos (VE) surgieron en el siglo XIX –como el carruaje eléctrico de Robert Anderson (1832–1839) y el diseño del motor de Thomas Davenport (1835)–, su comercialización fue limitada debido a la ausencia de infraestructura eléctrica, la baja densidad energética de las baterías de plomo-ácido y los altos costos de producción (Duran, 2024; Mercado & Córdova, 2014).

Durante el siglo XX, la adopción masiva de motores de combustión interna se atribuyó a varios factores: la introducción del arrancador eléctrico, la producción en masa (por ejemplo, el Ford Modelo T), el acceso abundante a petróleo y el menor costo relativo de los vehículos a gasolina (Freysenet, 2011). No obstante, la crisis del petróleo de 1973 reavivó el interés por soluciones alternativas, impulsando el desarrollo de modelos eléctricos como el CitiCar.

En las siguientes décadas, los avances más significativos incluyeron:

- a) Desarrollo de baterías avanzadas. La transición de las baterías de plomo-ácido a tecnologías como níquel-metal hidruro (NiMH) y, posteriormente, a iones de litio permitió mejorar la densidad energética y la autonomía de los vehículos. Actualmente, las investigaciones se centran en baterías de estado sólido, de aire-litio y de sodio-ión (Carbajal, 2010; Varela-Chávez, 2020).
- b) Nuevas tecnologías de almacenamiento. La incorporación de nuevos materiales activos y arquitecturas de batería, como níquel-metal hidruro, níquel-cadmio y litio-ion, ha buscado incrementar la capacidad de almacenamiento, la durabilidad y la seguridad de las baterías (Chávez & Lara, 2014).
- c) Sistemas de propulsión eléctrica. La optimización de motores eléctricos, inversores y sistemas de control ha incrementado significativamente la eficiencia de los trenes motrices eléctricos (IEA, 2022).
- d) Tecnologías V2G y frenado regenerativo. Permiten recuperar energía durante el frenado y devolverla a la red eléctrica, estableciendo una interacción activa entre el vehículo y el sistema energético (Varela-Chávez, 2020).
- e) Digitalización vehicular. La integración de conectividad celular, sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), actualizaciones inalámbricas (OTA) y aplicaciones inteligentes ha convertido a los vehículos eléctricos en plataformas digitales sobre ruedas (Sever & Contissa, 2024).

En paralelo, la Industria 4.0 ha transformado la manufactura mediante tecnologías como el Internet de las Cosas, Big Data, inteligencia artificial, robótica avanzada, impresión 3D, gemelos digitales y ciberseguridad industrial. La manufactura inteligente ha permitido a empresas como Tesla, BMW y Volkswagen reconfigurar sus líneas de producción, optimizar el mantenimiento predictivo y acortar los ciclos de diseño a través de simulaciones virtuales.

El uso de exoesqueletos, robots colaborativos (cobots) y sistemas modulares ha incrementado la seguridad, eficiencia y flexibilidad en las plantas de producción (Lewicki & Drożdż, 2021; Rozo-García, 2020). Estas tecnologías han facilitado la producción a gran escala de vehículos eléctricos (VE), manteniendo altos estándares de calidad y trazabilidad, consolidando la convergencia entre sostenibilidad y digitalización industrial.

Transformaciones del mercado: adopción, producción y nuevos modelos de negocio

Desde 2010, el mercado de vehículos eléctricos ha crecido exponencialmente. En ese año se lanzaron los primeros modelos producidos en masa (Nissan Leaf, Chevrolet Volt). Para 2023, las ventas globales alcanzaron los 14 millones de unidades, representando 18% de todas las ventas de vehículos nuevos, con una flota global de VE que supera los 40 millones de unidades. Según datos de la IEA (2023), China lidera el mercado con 60% de las ventas globales, seguida de Europa con 25%, mientras que Estados Unidos tiene el 10%.

Este crecimiento ha sido impulsado por políticas fiscales favorables –como en Noruega, donde los VE representan más del 85% del mercado–, subsidios directos, normativas estrictas de emisiones y el despliegue acelerado de infraestructura de carga rápida. Además, la caída en los costos de las baterías ha permitido que algunos modelos eléctricos alcancen la paridad de precios con los vehículos de combustión interna.

Este cambio ha transformado la cadena de suministro automotriz; los motores eléctricos requieren menos componentes (sin escape, tanque o transmisiones), lo cual plantea riesgos de obsolescencia para proveedores tradicionales, pero genera nuevas oportunidades en baterías, electrónica de potencia, *software* y sistemas de carga. Empresas como Bosch, GKN Automotive y Pirelli han comenzado a reestructurar sus portafolios para alinearse con las demandas de la electromovilidad, invirtiendo en tecnologías como eAxles, neumáticos optimizados y sistemas de gestión térmica (De Cabo, 2024; GKN Automotive, 2024; Pirelli, s. f.).

Además, actualmente surgen nuevos modelos de negocio basados en plataformas digitales, servicios de movilidad (*carsharing*, suscripciones), retorno de energía a la red (V2G) y el *software* como fuente de ingresos recurrentes. Tesla, Rivian, Lucid y otras *startups* han demostrado que la integración vertical, el dominio del *software* y el diseño basado en datos son pilares fundamentales de la nueva industria automotriz.

Fases evolutivas en la coevolución de la electromovilidad e Industria 4.0

A partir del análisis de literatura científica y gris, se identificaron cinco fases que configuran la trayectoria coevolutiva entre electromovilidad e Industria 4.0. Estas fases no deben entenderse como procesos paralelos o autónomos, sino como momentos históricos en los que se reconfiguran de manera interdependiente las tecnologías, políticas, capacidades productivas y marcos institucionales. A continuación, se describen las principales características de cada etapa.

Fase 1. Innovación inicial y primeros sistemas automatizados (antes de 1970)

Esta etapa marca los orígenes de la electromovilidad y los primeros desarrollos en automatización industrial. Durante el siglo XIX surgieron diversos prototipos de vehículos eléctricos, con aportaciones destacadas de Robert Anderson y Ányos Jedlik (Duran, 2024). Aunque los vehículos eléctricos gozaron de cierta popularidad a inicios del siglo XX por su funcionamiento silencioso y facilidad de uso, fueron finalmente desplazados por los vehículos con motor de combustión interna. Esto se debió, en gran medida, a la introducción de la producción en masa por parte de Ford en 1913, la caída en los precios del petróleo y la escasa infraestructura eléctrica (Freyssenet, 2011; Mercado & Córdova, 2014).

De forma paralela, se sentaron las bases de la automatización industrial con la introducción de líneas de ensamblaje, los primeros sistemas de control numérico computarizado (CNC) en la década de 1950, y el desarrollo del primer brazo robótico industrial, Unimate, en 1961. En términos de políticas públicas, aún no existían regulaciones ambientales significativas durante este periodo.

Fase 2. Digitalización inicial y resurgimiento de la electromovilidad (1970–2000)

La crisis del petróleo de 1973 marcó un punto de inflexión en la conciencia energética global, lo que reavivó el interés por fuentes de energía alternativas, incluyendo la electromovilidad. Esta coyuntura también impulsó una incipiente regulación ambiental, especialmente en Estados Unidos y Europa. Asimismo, se caracteriza por avances tecnológicos en ambos dominios. En electromovilidad, surgieron baterías más eficientes, como las de hidruro metálico de níquel (NiMH), que dieron lugar al Toyota Prius (1997), siendo este el primer vehículo híbrido producido en masa. También se introdujeron modelos experimentales de vehículos eléctricos, como el GM EV1 (1996), aunque su comercialización fue limitada (Chávez & Lara, 2014).

En el ámbito industrial, las herramientas de diseño y manufactura asistidas por computadora (CAD/CAM) se volvieron estándar, se expandió el uso de controladores lógicos programables (PLC), y emergieron los sistemas de manufactura flexible (FMS), que permitieron una mayor adaptabilidad. Los robots programables comenzaron a integrarse en tareas específicas. Durante este periodo, Estados Unidos y Europa establecieron sus primeras normas de emisiones, mientras que Japón se posicionó como líder en tecnologías híbridas, particularmente con el desarrollo del Prius.

Fase 3. Fundamentos tecnológicos para la Industria 4.0 y despegue de los vehículos eléctricos (2000–2011)

Esta etapa sentó las bases tecnológicas para la posterior implementación de la Industria 4.0, al tiempo que la electromovilidad comenzó a ganar impulso. Las baterías de iones de litio, desarrolladas originalmente por Sony en 1991, fueron adaptadas al uso automotriz, permitiendo mayores autonomías (Varela-Chávez, 2020). En 2008, Tesla lanzó el Roadster, el primer automóvil deportivo eléctrico de largo alcance, lo que cambió la percepción del mercado sobre los VE (Rodríguez, 2022).

Simultáneamente, se profundizó la digitalización industrial con la aparición de tecnologías como el Internet de las Cosas, Big Data y los primeros sistemas ciberfísicos, aunque el término "Industria 4.0" aún no había sido acuñado. Se intensificaron los subsidios para VE, especialmente en Estados Unidos y la Unión Europea. Esta fase estableció las condiciones para la convergencia entre digitalización y sostenibilidad que se consolidaría en la década siguiente.

Fase 4. Industria 4.0 y digitalización de la movilidad (2011–2020)

En 2011, Alemania introdujo oficialmente el concepto de “Industria 4.0”, que planteaba una profunda transformación digital de la industria mediante la interconexión de máquinas, productos y sistemas inteligentes. El objetivo era aumentar la eficiencia, productividad y flexibilidad de la producción mediante tecnologías como IoT, inteligencia artificial y automatización avanzada. Durante esta década, las plantas automotrices adoptaron sensores, así como las siguientes innovaciones: control en tiempo real, mantenimiento predictivo, impresión 3D y robótica colaborativa, especialmente en la producción de vehículos eléctricos (Lewicki & Drożdż, 2021).

La electromovilidad entró en una fase de rápida expansión, donde modelos para el mercado masivo como el Nissan Leaf y el Tesla Model “S” se comercializaron ampliamente. Se profundizó la digitalización de la movilidad eléctrica mediante tecnologías como la carga bidireccional (V2G), los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), el monitoreo remoto, la conectividad V2X y la integración entre vehículos, infraestructura y redes inteligentes (Vermesan *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2022). China emergió como líder mundial en la producción y venta de VE, mientras que Europa y Estados Unidos endurecieron sus regulaciones ambientales. La convergencia entre digitalización, sostenibilidad y movilidad se volvió cada vez más evidente.

Fase 5. Twin transition: digitalización completa y sostenibilidad (2020–presente)

Esta fase representa una inflexión en la trayectoria coevolutiva, donde la integración sistémica entre electromovilidad e Industria 4.0 se institucionaliza como *twin transition*. Las plantas evolucionan hacia entornos ciberfísicos automatizados y neutros en carbono, habilitados por gemelos digitales, IA, manufactura aditiva y 5G industrial. Al mismo tiempo, los vehículos eléctricos se convierten en plataformas digitales, conectadas, autónomas y energéticamente integradas.

Aunque esta fase puede interpretarse como una continuidad de los procesos previos, en realidad marca un salto cualitativo. Lo que observamos es una aceleración estructural, impulsada por la articulación estratégica entre políticas públicas, inversión privada, capacidades digitales y nuevos modelos de negocio (Tabla 1). En este escenario, la coevolución ya no es una categoría analítica, sino una condición operativa para la transformación industrial.

Tabla 1. Tendencias estratégicas en inversión, tecnología y modelos de negocio.

Categoría	Función estratégica	Ejemplos
Política pública e inversión	Actúan como palancas para redirigir flujos financieros y normativos hacia modelos productivos sostenibles y digitalizados.	Subsidios a VE e infraestructura (UE, EE. UU., China); Ley IRA (2022); Fit for 55.
Adopción tecnológica en manufactura	Permite escalar la producción de VE bajo estándares de eficiencia, trazabilidad y flexibilidad.	Robótica avanzada (Tesla, BYD); impresión 3D (BMW); blockchain en baterías.
Nuevos modelos de negocio	Reconfiguran el mercado automotriz al desbordar el modelo tradicional de ensamblaje y venta.	Tesla (integración vertical); Rivian y Lucid (simulación digital); Foxconn (plataforma VE).

Fuente: Elaboración propia con base en IEA (2021), World Economic Forum (2023) y European Commission (2021).

Estas dinámicas reconfiguran el campo de juego. La intervención estatal no se limita a subsidiar, redefine incentivos, impone límites al modelo fósil y canaliza recursos hacia nuevas capacidades productivas. En paralelo, las tecnologías de la Industria 4.0 habilitan una manufactura inteligente, orientada por datos y más sostenible. La irrupción de nuevos actores que integran *hardware*, *software* y servicios – bajo esquemas de plataformas digitales– está desplazando a los modelos tradicionales centrados en economías de escala. En este sentido, la coevolución no es una opción, sino el resultado de presiones estructurales que exigen sincronizar transformación digital, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica.

La Tabla 2 resume los hitos clave y las características de cada una de las fases.

Tabla 2. Fases de la evolución conjunta de la Electromovilidad e Industria 4.0.

Fase	Electromovilidad	Industria 4.0	Contexto de mercado y regulatorio
Antes de 1970 Innovación inicial y primeros sistemas automatizados	Primeros prototipos de VE en el siglo XIX (Anderson, Jedlik). Uso limitado por baja densidad energética y falta de infraestructura. Reemplazo progresivo por el motor de combustión interna gracias a la producción en masa (Ford, 1913).	Introducción de líneas de ensamble, primeros sistemas CNC en los años 50 y desarrollo de Unimate (1961). El primer robot industrial.	Dominio total de los motores de combustión interna. Sin normativas ambientales relevantes.
1970–2000 Digitalización inicial y resurgimiento de la electromovilidad	Crisis del petróleo de 1973 renueva el interés en los VE. Desarrollo de baterías NiMH. Toyota Prius (1997), primer híbrido producido en masa. Prototipos como el GM EV1 (1996).	Generalización de CAD/CAM, expansión de PLCs y aparición de sistemas de maufactura flexible. Introducción de robots programables en tareas específicas.	Surgen las primeras normas de emisiones en EE. UU. y Europa. Japón lidera en híbridos. Aumenta la preocupación por el ambiente.
2000–2011 Fundamentos tecnológicos y despegue de los VE	Baterías de iones de litio adaptadas al uso automotriz. El lanzamiento del Tesla Roadster (2008) redefine el mercado. Expansión inicial de la infraestructura de carga.	Aún no se formaliza el término "Industria 4.0", pero emergen las tecnologías IoT, Big Data y sistemas ciberfísicos en fábricas.	Se intensifican subsidios para VE en EE. UU. y UE. Se consolida una percepción pública hacia la electromovilidad.
2011–2020 Industria 4.0 y digitalización de la movilidad	Comercialización masiva del Nissan Leaf y Tesla Model S. Se implementan ADAS, V2G y monitoreo remoto.	Alemania introduce el término "Industria 4.0". Integración de IA, sensores, impresión 3D, mantenimiento predictivo y robótica colaborativa.	Europa y EE. UU. endurecen regulaciones ambientales. Impuestos a vehículos contaminantes. China lidera la producción global.
2020–presente Transición dual: digitalización completa y sostenibilidad	Ecosistema digital conectado: IA embarcada, V2G, plataformas y movilidad autónoma. Fuerte crecimiento en ventas globales.	Fábricas inteligentes automatizadas con gemelos digitales, manufactura aditiva y 5G industrial. Producción neutra en carbono.	UE, EE. UU. y China establecen fechas para eliminar autos de combustión. Inversiones en baterías, infraestructura y tarifas verdes.

Fuente: Elaboración propia con base en Salkin *et al.* (2018), Chávez & Lara (2014), Lee & Lee (2015), Barja-Martínez *et al.* (2021) y Tao *et al.* (2019).

Discusión: tensiones, desafíos y dilemas de la coevolución

Aunque la trayectoria compartida de la electromovilidad y la Industria 4.0 revela un patrón coevolutivo con alto grado de sinergia, este proceso no está exento de tensiones, asimetrías ni dilemas estructurales. Por ejemplo, en términos tecnológicos hay varios retos, particularmente en lo que a la electromovilidad se refiere: se necesita reducir el peso de los componentes, abaratar los precios de las baterías, hacer más eficiente el tiempo de las recargas, reducir los riesgos asociados a la conexión entre el auto y los puntos de carga y reducir los costos de la producción de la electricidad, solo por citar algunos aspectos. Por lo tanto, el desarrollo de la electromovilidad no es independiente de las mejoras tecnológicas, aunque no hay una relación directa entre ellas, más bien estas se encuentran en proceso de coevolución (Sandén *et al.*, 2013).

La posibilidad de seguir avanzando y mejorando los ejes centrales de la electromovilidad hoy están ligados particularmente a la Industria 4.0, que se integra por varias innovaciones tecnológicas tales como: la realidad aumentada, el Internet de las Cosas, la nube, la analítica de datos, la impresión 3D, la simulación, y los sistemas de integración vertical y horizontal, la automatización, el *blockchain*, la robótica y la ciberseguridad, entre otras tecnologías (Rozo-García, 2020; Sivertsson & Utz, 2021). Esta industria juega un papel importante en el desarrollo de la electromovilidad al facilitar el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía (las baterías) y el diseño de la infraestructura, por ejemplo (Lewicki & Drożdż, 2021).

Los argumentos presentados por Curiel-Ramírez *et al.* (2020) reafirman esto, pues ellos señalan que el desarrollo de la electromovilidad depende de la adopción de múltiples tecnologías asociadas a la Industria 4.0. La posibilidad de establecer sistemas de comunicación entre los vehículos y entre estos y la infraestructura que estos requieren implica hacer uso del Internet de las Cosas, la inteligencia artificial y procesos de aprendizaje de tipo automático. De igual manera se requiere del uso de estrategias de ciberseguridad que protejan los sistemas de electromovilidad y los datos que se generan y acumulan en el proceso de toma de decisiones, particularmente al hacer uso de los VE o de los autos autónomos.

Más allá de los avances tecnológicos y la transformación de modelos de negocio, la articulación entre ambos dominios plantea desafíos significativos en los planos institucional, socioeconómico y geopolítico.

Uno de los principales desafíos radica en la desincronización entre el ritmo de la innovación tecnológica y la capacidad institucional para acompañar dichos cambios. Mientras las empresas líderes han desarrollado capacidades organizacionales y tecnológicas orientadas a la implementación de sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial y producción modular, muchos marcos regulatorios –particularmente en países en desarrollo– carecen de infraestructura jurídica o agilidad normativa. Esta brecha puede generar vacíos regulatorios en torno a temas como la ciberseguridad industrial, la trazabilidad energética o el reciclaje de baterías (Ciarli *et al.*, 2021; Von Tunzelmann, 2003).

Además, el despliegue de la electromovilidad digitalizada tiende a reproducir desigualdades estructurales. Las capacidades necesarias para esta doble transición –infraestructura eléctrica, conectividad, talento especializado, financiamiento– no están distribuidas equitativamente a nivel empresarial. Como advierten Da Silva & Zawislak (2023), la acumulación desigual de capacidades de innovación puede ampliar la brecha entre empresas líderes y rezagadas, así como entre territorios.

También se observa una creciente concentración de poder tecnológico y económico. Empresas como Tesla, CATL, BYD y Nvidia han logrado integrar verticalmente múltiples eslabones de la nueva cadena de valor, generando fenómenos de dependencia tecnológica. Esta concentración puede restringir la soberanía industrial de otros países, dificultando la construcción de ecosistemas nacionales de innovación autónomos (Geels, 2002; Pérez, 2005).

A ello se suma la presión socioambiental sobre las cadenas de suministro emergentes, especialmente en relación con minerales críticos como litio, cobalto y níquel. Aunque los VE reducen emisiones en uso, su producción puede generar impactos significativos si no se regula adecuadamente. Marcos como el Reglamento de Baterías de la Unión Europea buscan atender estos desafíos, aunque persisten brechas en trazabilidad, derechos laborales y economía circular.

Tampoco debe subestimarse el papel de los consumidores. Como señalan Pedrosa & Nobre (2019) y Deloitte (2020), aún existen resistencias a abandonar vehículos de combustión interna. Factores como el costo, la autonomía, los tiempos de recarga y la percepción de riesgo influyen en la adopción.

Asimismo, la transformación del empleo presenta un panorama ambivalente. Por un lado, se generan nuevos puestos de trabajo en automatización, *software*, ingeniería de datos y gestión energética. Por otro, desaparecen roles tradicionales vinculados a motores de combustión y transmisiones. Una transición justa requerirá políticas activas de recualificación y estrategias educativas que integren competencias digitales desde etapas tempranas.

En el contexto europeo, la denominada *twin transition* se ha concebido como un proceso sistémico que articula la digitalización productiva con los objetivos de sostenibilidad ambiental, particularmente en sectores estratégicos como el automotriz. La literatura reciente subraya que esta transición no se reduce a la adopción aislada de tecnologías digitales o verdes, sino que implica transformaciones más amplias en las capacidades productivas, los marcos regulatorios y la organización de las cadenas de valor (Ciarli et al., 2021; Youssef, 2025). En este marco, la electrificación del transporte y la incorporación de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 han avanzado de manera interrelacionada, impulsadas por políticas industriales orientadas a la descarbonización, la innovación y la competitividad.

Sin embargo, los estudios disponibles tienden a analizar estos procesos de forma fragmentada, ya sea desde la óptica de la digitalización industrial o desde la transición energética. Análisis recientes sobre la Unión Europea muestran, además, que las inversiones vinculadas a la *twin transition* presentan patrones territoriales diferenciados, revelando tensiones en términos de capacidades tecnológicas, especialización productiva y cohesión regional (Barbero et al., 2025). A partir de este vacío analítico, el presente trabajo propone una lectura integradora que permite comprender la coevolución entre electromovilidad e Industria 4.0 como una trayectoria compartida, estructurada en fases, que contribuye a explicar tanto los avances como las asimetrías observadas en el contexto europeo.

¿Qué desafíos y oportunidades enfrentan los países emergentes?

El impacto de la *twin transition* en países emergentes como México dependerá de su capacidad para convertir esta convergencia en una plataforma de desarrollo productivo e innovación tecnológica. Hoy, las asimetrías en infraestructura digital, talento y financiamiento limitan la absorción tecnológica y la inserción activa en cadenas globales.

Sin embargo, el reordenamiento geoeconómico, el *nearshoring* y las exigencias de sostenibilidad abren espacios estratégicos. México podría posicionarse como plataforma regional en nichos como electromovilidad ligera, manufactura de componentes eléctricos, reciclaje de baterías o servicios digitales especializados.

Una lección clave para el país es que, sin una estrategia multisectorial, articulación institucional y visión de largo plazo, las oportunidades pueden diluirse. No basta con atraer inversión, pues se requiere desarrollar capacidades propias, establecer normas claras y fortalecer la gobernanza tecnológica.

En suma, la coevolución entre electromovilidad e Industria 4.0 no es lineal ni neutral. Su impacto dependerá de decisiones políticas, capacidades institucionales y organizacionales y del tipo de transición que se construya: inclusiva, sostenible y con soberanía productiva.

Conclusiones

La coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0 representa una de las transformaciones industriales más complejas y decisivas de las últimas décadas, al articular de manera simultánea procesos de digitalización productiva y transición hacia sistemas de movilidad más sostenibles.

Los hallazgos de este estudio muestran que el desarrollo de los vehículos eléctricos no puede comprenderse sin considerar la adopción de tecnologías asociadas al paradigma de la Industria 4.0. De manera complementaria, la necesidad de modelos de producción más flexibles, eficientes y centrados en el usuario ha acelerado la transformación digital de los procesos manufactureros y el despliegue de nuevas capacidades tecnológicas a nivel empresarial. Esta relación simbiótica ha dado lugar a un circuito de retroalimentación entre productos y procesos, capacidades organizacionales y marcos regulatorios, así como entre estrategias empresariales y política pública.

El artículo aporta una lectura integradora de la transformación reciente de la industria automotriz al analizar de manera conjunta la coevolución entre la electromovilidad y la Industria 4.0. A partir de una revisión estructurada de la literatura científica y gris, se propone una periodización analítica en cinco fases que permite identificar patrones recurrentes, momentos de convergencia tecnológica y tensiones estructurales asociadas a la doble transición digital y sostenible. Este enfoque contribuye a superar aproximaciones fragmentadas que analizan estos procesos de forma aislada y ofrece una base conceptual útil para estudios comparados y para el análisis de políticas industriales en contextos con capacidades y trayectorias diferenciadas.

Una contribución adicional del estudio consiste precisamente en la propuesta de esta periodización interpretativa de cinco fases evolutivas, la cual permite mapear no solo momentos de inflexión tecnológica, sino también puntos de convergencia y aceleradores históricos. Lejos de imponer una cronología rígida, este marco busca ofrecer una herramienta analítica flexible para el estudio comparado de la política industrial, la gobernanza tecnológica y las estrategias empresariales en distintos contextos nacionales y regionales. Esta aproximación dialoga con marcos conceptuales como los propuestos por Von Tunzelmann (2003), Pérez (2005) y Geels (2002), al reconocer que las transiciones tecnológicas no responden a determinismos lineales, sino a procesos coevolutivos mediados por instituciones, capacidades y conflictos.

No obstante, esta trayectoria coevolutiva no está exenta de tensiones. Persisten desafíos estructurales relacionados con la gobernanza de la innovación, la distribución desigual de capacidades tecnológicas (Da Silva & Zawislak, 2023), la concentración del poder económico, los impactos socioambientales asociados a la extracción de minerales críticos y la transformación del empleo industrial. A ello se suma la resistencia de los consumidores frente a la adopción masiva de vehículos eléctricos (Deloitte, 2020; Pedrosa & Nobre, 2019), lo que pone de relieve la necesidad de analizar no solo la oferta tecnológica, sino también las condiciones sociales e institucionales que influyen en su aceptación.

De cara al futuro, se abre una agenda de investigación amplia y fértil. Resulta pertinente profundizar en el análisis de los impactos diferenciados de esta doble transición según el tipo de empresa, el contexto regional o el diseño de las políticas públicas. Asimismo, es relevante explorar el papel de actores emergentes -como las *start-ups* tecnológicas, las ciudades inteligentes o las alianzas multisectoriales- en la configuración de nuevas trayectorias de innovación. Finalmente, se vuelve necesario repensar modelos híbridos de gobernanza tecnológica que logren articular eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental y legitimidad democrática, y que contribuyan a reducir las brechas digitales y territoriales que caracterizan esta nueva era industrial.

Agradecimientos

DGAPA PAPIIT IN304122 "Propuesta metodológica para la medición de las Capacidades de Innovación y Absorción 4.0".

DGAPA PAPIIT IN305525 "Impacto de la electromovilidad en el sector automotriz: oportunidades y desafíos."

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Aboagye, A., Hensley, R., Padhi, A., & Shafi, D. (13 de diciembre de 2017). *Facing digital disruption in mobility as a traditional auto player*. McKinsey.com. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/facing-digital-disruption-in-mobility-as-a-traditional-auto-player>
- Altenburg, T. (2009). Building inclusive innovation system in developing countries: challenges for IS research. En B. A. Lundvall, K. J. Joseph, C. Chaminade & J. Vang (eds.), *Handbook of innovation system and developing countries* (pp. 33-55). Edward Elgar.
- Balsalobre-Lorente, D., Contente, C., Leitão, N. C., & Cantos-Cantos, J. M. (2023). The influence of economic complexity processes and renewable energy on CO2 emissions of BRICS. What about industry 4.0?. *Resources Policy*, 82, 103547. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103547>
- Barbero, J., Collado, L. A., Rodríguez-Crespo, E., & Santos, A. M. (2025). The twin transition in the European Union: assessing regional patterns of EU-funded investments. *European Planning Studies*, 33(10), 1801-1821. <https://doi.org/10.1080/09654313.2025.2528882>
- Barja-Martínez, S., Aragués-Pañalba, M., Munné-Collado, I., Lloret-Gallego, P., Bullich-Massagué, E., & Villafañal-Robles, R. (2021). Artificial intelligence techniques for enabling Big Data services in distribution networks: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111459>
- Benézéch, D. (2011). The Open Innovation model: some issues regarding its internal consistency. *Journal of Innovation Economics & Management*, 2(10), 145-165. <https://shs.cairn.info/revue-journal-of-innovation-economics-2012-2-page-145?lang=fr>

- Bentley, R. W., Mannan, S. A., & Wheeler, S. J. (2007). Assessing the date of the global oil peak: the need to use 2P reserves. *Energy Policy*, 35(12), 6364–6382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.001>
- Biondi, L., & Galli, R. (1992). Technological trajectories. *Futures*, 24(6), 580-592. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001632879290118Y>
- Bower, J. L., & Christensen, C. M. (1995). Disruptive technologies: catching the wave. *Harvard Business Review*, 73(1), 43–53. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=2312364>
- Carbajal, Y. (2010). Sector automotriz: reestructuración tecnológica y reconfiguración del mercado mundial. *Paradigma Económico. Revista de Economía Regional y Sectorial*, 2(1), 24-52. <https://paradigmaeconomico.uaemex.mx/article/view/4807>
- Chávez, A., & Lara, A. (2014). Propiedad intelectual y evolución de la naturaleza compleja de los vehículos eléctricos. *Economía: Teoría y Práctica*, 40, 103-136. <https://economiatyp.uam.mx/index.php/ETYP/article/view/84>
- Chinoracky, R., Stalmasekova, N., & Corejova, T. (2022). Trends in the Field of Electromobility – From the Perspective of Market Characteristics and Value-Added Services: Literature Review, *Energies*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/en15176144>
- Christensen, C. M. (1997). *The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail*. Harvard Business School Press. <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=46>
- Ciarli, T., Kenney, M., Massini, S., & Piscitello, L. (2021). Digital technologies, innovation, and skills: emerging trajectories and challenges. *Research Policy*, 50(7), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104289>
- Cimoli, M., & Dosi, G. (1994). De los paradigmas tecnológicos a los sistemas nacionales de producción e innovación. *Comercio Exterior*, 669-682. <https://desarrollomedellin.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/02/cimoli-1994.pdf>
- Cugno, M., Castagnoli, R., Büchi, G., & Pini, M. (2022). Industry 4.0 and production recovery in the covid era. *Technovation*, 114, 102443. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102443>
- Curiel-Ramirez, L. A., Ramirez-Mendoza, R. A., Bustamante-Bello, M. R., Morales-Menendez, R., Galván, J. A., & Lozoya-Santos, J. J. (2020). Smart Electromobility: interactive ecosystem of research, innovation, engineering, and entrepreneurship. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14, 1443-1459. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00710-8>
- Da Silva, L., & Zawislak, P. A. (2023). Towards a theory of capability-based transactions: bounded innovation capabilities, commercialization, cooperation, and complementarity. *Technology in Society*, 75, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102382>
- De Cabo, A. (10 de abril de 2024). Bosch auto parts business faces EV transition hurdles. *El País*. <https://english.elpais.com/economy-and-business/2024-04-10/boschs-auto-parts-business-faces-ev-transition-hurdles.html>
- Delgado-Fernández, M. (2024). Modelos de gestión de la innovación: conceptos, enfoques, normas y tendencias. *Ingeniería Industrial*, 45(1), 1-9. <https://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/article/view/1258>
- Deloitte. (2020). *Electric Vehicles. Setting a course for 2030*. https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/22869-electric-vehicles/DI_Electric-Vehicles.pdf
- Dodgson, M. (1993). Organizational learning: a review of some literatures. *Organization Studies*, 14(3), 375-394. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/017084069301400303>
- Duran, I. (6 de enero de 2024). *Cómo fue el primer auto eléctrico de la historia*. Infobae.com. <https://www.infobae.com/tecnologia/2024/01/06/como-fue-el-primer-auto-electrico-de-la-historia/>
- European Commission. (2021). *Delivering the European Green Deal: The Decisive Decade*. https://commission.europa.eu/publications/delivering-european-green-deal_en
- ExpokNews. (27 de enero de 2010). 2010: El año en que los autos eléctricos pasaron de sueño a realidad. *Expoknews.com*. <https://www.expoknews.com/2010-autos-electricos-sueno-realidad/>
- Franco, C., Facanha, S., & Couto, R. (2018). Technological coevolution in the electric energy sector. *RAUSP Management Journal*, 53(2), 164-177. <https://doi.org/10.1016/j.rausp.2017.02.001>

- Freysenet, M. (2011). Lo más dudoso no es lo más improbable: el coche eléctrico. La nueva revolución del automóvil. *Jornada internacional "Movilidad sostenible y vehículo eléctrico, el motor de la innovación local"*, 15 de febrero de 2011, Valladolid, España.
<http://www.freysenet.com/files/Lo%20mas%20dudoso%20no%20es%20lo%20mas%20improbable%20el%20coche%20electrico%20La%20nueva%20revolucion%20del%20automovil.pdf>
- García, N. (2019). *Electromovilidad. Tendencias y experiencia nacional e internacional* [Asesoría Técnica Parlamentaria]. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27343/1/BCN__Electromovilidad_Experiencias_comparadas_.pdf
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8-9), 1257-1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- GKN Automotive. (18 de enero de 2024). *GKN Automotive receives science based targets initiative approval on net-zero emissions target*.
<https://www.gknautomotive.com/en/news-and-media/latest-news-and-insights/2024/gkn-automotive-receives-science-based-targets-initiative-approval-on-net-zero-emissions-target/>
- Helpman, E., & Grossman, G. M. (1993). *Innovation and growth in the global economy*. The MIT Press.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Global EV Outlook 2021*.
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Global EV Outlook 2022*.
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions*.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>
- Jasso, J. (2004). Trayectoria tecnológica y ciclo de vida de las empresas: una interpretación metodológica acerca del rumbo de la innovación. *Contaduría y Administración*, (214), 83-96.
<https://www.redalyc.org/pdf/395/39521405.pdf>
- Johnson, B., & Lundvall, B. (1994). Sistemas Nacionales de Innovación y Aprendizaje Institucional. *Comercio Exterior*, 44(8), 695-704. <https://ru.dgb.unam.mx/items/b0e87a24-020c-4213-ac39-d801343dae2e>
- KPN Energy. (18 de marzo de 2022). *Electromovilidad automotriz: 5 puntos claves para entender todo sobre la misma*.
<https://kpnenergy.com/entender-todo-electromovilidad/>
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- Levitt, B., & March, J. (1988). Organizational learning. *Annual Reviews*, 14, 319-340.
<https://doi.org/10.1146/annurev.so.14.080188.001535>
- Lewicki, W., & Drożdż, W. (2021). Electromobility and its development prospects in the context of Industry 4.0: a comparative study of Poland and the European Union. *European Research Studies Journal*, 24(2), 135-144.
<https://doi.org/10.35808/ersj/2207>
- Linares, J. (2023). La movilidad eléctrica en México en la tercera década del siglo XXI. Retos y oportunidades. En J. E. Isaac (coord.), *Nuevas territorialidades-economía sectorial y reconfiguración territorial* (pp. 409-430). UNAM-AMECIDER. <https://ru.iiec.unam.mx/6142/>
- Lynskey, M. J. (2006). Transformative technology and institutional transformation: coevolution of biotechnology venture firms and the institutional framework in Japan. *Research Policy*, 35(9), 1389-1422.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.07.003>
- Machuca-Contreras, F., Canova-Barrios, C., & Castro, M. (2023). Una aproximación a los conceptos de innovación radical, incremental y disruptiva en las organizaciones. *Región Científica*, 2(1), 1-9.
<https://doi.org/10.58763/rc202324>
- Mercado, A., & Córdova, K. (2014). Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica: ¿Sistemas tecnológicos disruptivos promovidos por imperativos ambientales?. *Cuadernos del Cendes*, 31(85), 1-21.
https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1012-25082014000100002&script=sci_abstract
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Belknap Pr.

- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1999). *La organización creadora de conocimiento*. Oxford University Press.
- Nooteboom, B. (2000). *Learning and innovation in organizations and economies*. Oxford University Press.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2018). *Oslo Manual 2018. Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation*.
https://www.oecd.org/en/publications/oslo-manual-2018_9789264304604-en.html
- Pedrosa, G., & Nobre, H. (2019). The influence of consumer mobility concerns on electric vehicle adoption. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 8(4), 366–390.
<https://doi.org/10.1504/WRITR.2019.103293>
- Pérez, C. (2005). Revoluciones tecnológicas y paradigmas tecnoeconómicos. *Tecnología y Construcción*, 21(1), 77-86.
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_tc/article/view/2886
- Pirelli. (s. f.). *Electric vehicles (EV) tires*. <https://www.pirelli.com/tyres/en-ww/car/catalogue/electric-car-tyres>
- Rodríguez, J. (16 de noviembre de 2022). ¿Son los vehículos eléctricos un nuevo invento?. *Expansión*.
<https://expansion.mx/vida-arte/2022/11/16/historia-de-los-autos-electricos>
- Rodríguez, J. S., & Quintero, I. C. (2022). Capacidades de innovación empresarial en América Latina. Revisión de literatura. *Ciencias Administrativas*, 10(19), 1-14. <https://doi.org/10.24215/23143738e096>
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177-192. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/10720>
- Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). A conceptual framework for Industry 4.0. En A. Ustundag & E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: managing the digital transformation* (pp. 3-23). Springer.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-57870-5_1
- Sandén, B. A., Grauers, A., Sarasini, S., & Karlström, M. (2013). *Systems perspectives on electromobility*. Chalmers.se.
https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/182216/local_182216.pdf
- Schumpeter, J. (1978). *Teoría del desenvolvimiento económico: una investigación sobre la ganancia, capital, crédito y ciclo económico*. FCE.
- Sever, T., & Contissa, G. (2024). Automated driving regulations – where are we now?. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 24, 101033. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101033>
- Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- Sivertsson, M., & Utz, J. M. (2021). *The Influence of Industry 4.0 on Globalisation Strategies of Multinational Enterprises: A Qualitative Study of MNEs and Their Business Decisions Regarding Offshoring and Reshoring Strategies* [Tesis de Maestría]. Jönköping University Business School.
<https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1557014&dswid=-5009>
- Souitaris, V. (2002). Technological trajectories as moderators of firm-level determinants of innovation. *Research Policy*, 31(6), 877-898. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00154-8)
- Tang, X., Sun, Ch., Bi, S., Wang, S., & Zhang, A. Y. (2022). A Holistic Review on Advanced Bi-directional EV Charging Control Algorithms. *ACM SIGENERGY Energy Informatics Review*, 1(1), 1-10.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13565>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Van Audenhove, F. J., Tauvel, M., Ruhlmann, A., Panarin, V., Seidel, P., Zintel, M., Hensler, A., Carlier, J., Reim, S., Arby, H., Eagar, R., Beard, M., Joumaa, A., & Chow, D. (2024). *The future of mobility 5.0: changing gear in the journey toward sustainable mobility*. Adlittle.com. <https://www.adlittle.com/en/insights/report/future-mobility-50>
- Varela-Chávez, C. (2020). Aplicaciones de energía cinética en electromovilidad autónoma y sostenible. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 167-180. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553768213016>
- Varón, D. R., Frasca, D. M., Gamboa, E., Benavides, D. D., & Vargas, H. (2017). La disrupción digital (I): modelos de negocio, innovación, conocimiento y tecnología. *Revista Vector*, 12, 22-31.
<https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vector/article/view/233>

- Vermesan, O., John, R., Pype, P., Daalderop, G., Kriegel, K., Mitic, G., Lorentz, V., Bahr, R., Sand, H., Bockrath, S., & Waldhör, S. (2021). Automotive Intelligence Embedded in Electric Connected Autonomous and Shared Vehicles Technology for Sustainable Green Mobility. *Frontiers in Future Transportation*, 2, 1-35. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2021.688482>
- Von Tunzelmann, N. (2003). Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions. *Structural Change and Economic Dynamics*, 14(4), 365-384. [https://doi.org/10.1016/S0954-349X\(03\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0954-349X(03)00029-8)
- World Economic Forum (WEF). (2023). *The future of work in the green economy*. <https://www.weforum.org/stories/2023/06/the-future-of-work-in-the-green-economy/>
- Youssef, A. B. (2025). Twin transition: digital transformation pathways for sustainable innovation. *Sustainability*, 17(21), 1-28. <https://doi.org/10.3390/su17219491>
- Zhang, R., & Sun, T. (2024). Ink-based additive manufacturing for electrochemical applications. *Heliyon*, 10(12), e33023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33023>
- Zhang, Y. (2020). The map is not the territory: coevolution of technology and institution for a sustainable future. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 45, 56-68. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343520300725>
- Zhang, Y., & Li, Y. (2025). Enhancing innovation capabilities, digital management, and corporate competitiveness. *Finance Research Letters*, 73, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106595>