

# Los retos del sector eléctrico mexicano frente a la transición energética internacional

*Gabriel Alberto Rosas-Sánchez*

*Resumen:* El objetivo del presente trabajo es revisar los principales elementos que obstaculizan o impulsan el proceso de transición energética en el sector eléctrico internacional. A partir de ello, se construye una taxonomía que integra aspectos que permitirían un proceso exitoso de transición energética en el sector eléctrico de México a la luz del actual debate sobre el futuro del sector. Se utiliza la metodología de Análisis Multinivel propuesta por Geels (2019), que describe las características de una transición a partir de nicho, régimen y paisaje. Los resultados muestran que la participación de las energías renovables en la generación eléctrica del país disminuyó del 2002 al 2007 debido a los arreglos institucionales, la estructura de mercado y el bajo aprovechamiento de la geografía nacional. Además, el despliegue de las tecnologías solar y eólica se enfrentan a una serie de conflictos por excluir del esquema de beneficios a las comunidades rurales.

*Palabras clave:* transición energética, sector eléctrico, análisis multinivel, justicia energética, energías renovables, sector eléctrico de México.

## **The challenges of the Mexican electricity sector in the face of the international energy transition**

*Abstract:* The objective of this paper is to review the main elements that have hindered or boosted the process of energy transition in

Gabriel Alberto Rosas-Sánchez. Doctorado en Ciencias Económicas, Universidad Autónoma Metropolitana. Integrante de la Sociedad Mesoamericana y del Caribe de Economía Ecológica y del Innovation Information Initiative. Correo electrónico:

*Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, vol. 14, núm. 31, julio-diciembre de 2021, pp. 37-65. Fecha de recepción: 4 de noviembre de 2021. Fecha de aceptación: 19 de noviembre de 2021.

the international electricity sector. From this, a taxonomy is built that integrates aspects that would allow a successful process of energy transition in the electricity sector of Mexico in the light of the current debate on the future of the sector. It uses the methodology of Multilevel Analysis proposed by Geels (2019) that describes the characteristics of a transition from niche, regime, and landscape. The results show that the share of renewable energies in the country's electricity generation has decreased from 2002 to 2007 due to institutional arrangements, market structure and low utilization of national geography. In addition, the deployment of technologies such as solar and wind power are facing a series of conflicts for excluding rural communities from the benefits scheme.

*Keywords:* energy transition, electricity sector, multilevel analysis, energy justice, renewable energies, Mexico's electricity sector.

## **Introducción**

El siglo pasado se caracterizó por un incremento sustancial en el calentamiento global impulsado por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. De acuerdo con el informe International Panel on Climate Change (IPCC), publicado en agosto de 2021, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) desde la década de 1750 han sido inequívocamente causadas por actividades humanas.

Este informe integrado por más de tres mil páginas, 14 mil citas científicas y que involucró el trabajo de 234 autores en 66 países, expone de manera clara los efectos del cambio climático sobre los fenómenos naturales y daños irreversibles que ha provocado el desarrollo civilizatorio sobre los ciclos químicos de la Tierra. El mensaje es contundente. El ser humano ha provocado alteraciones nunca antes vistas sobre los ecosistemas, por ejemplo, el incremento de la temperatura, acidificación de los océanos, ascenso del nivel promedio del mar a causa del deshielo de los polos árticos, variaciones extremas del clima, precipitaciones, entre otras manifestaciones.

De esta manera, si se continúa con el actual esquema de producción predatorio con la naturaleza y se mantienen los niveles de GEI, el IPCC (2021) estima que para el año 2100 la temperatura del planeta pueda incrementarse entre 1.8 °C y 5.7 °C con relación a la

temperatura registrada durante el periodo de 1850-1900. Lamentablemente, el mismo reporte indica que el calentamiento global de 1.5 °C y 2 °C será superado durante el siglo XXI a menos que se produzcan reducciones profundas de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otro tipo de emanaciones de efecto invernadero.

Frente a esta compleja situación que atraviesa la condición humana en todas sus manifestaciones, los gobiernos del mundo han impulsado desde la década de 1990 diversas agendas internacionales a fin de disminuir las CO<sub>2</sub>. El primer acuerdo fue el Protocolo de Kyoto, cuya firma se realizó en 1997 y entró en vigor después de complejas negociaciones en 2005. Más tarde, para complementar y apoyar esta estrategia, la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (AGONU) aprobó la creación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible compuesta, entre otros aspectos, de 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), cuyo eje rector tiene la finalidad de hacer frente a la pobreza, empoderar a las mujeres en la toma de decisiones y afrontar la crisis climática. Meses más tarde, los representantes de 195 naciones se reunieron en Nueva York en 2015 para sentar las bases del Acuerdo de París. El fin de este tratado es detener las manifestaciones del cambio climático a causa del actual esquema productivo basado en el uso prolongado de insumos no renovables y de alto impacto ecológico.

Ambos acuerdos tienen como punto medular el papel de la energía (Delina, 2018). En efecto, los ODS privilegian el acceso a la energía asequible, confiable y sostenible a partir de reconfiguraciones de la matriz energética que ofrezca servicios energéticos provenientes de fuentes renovables. Al mismo tiempo, el Acuerdo de París indica que el nuevo camino para el desarrollo de las naciones depende de la sostenibilidad energética. Para garantizar estas condiciones, la transición energética permite construir soluciones sostenibles (Chen y Lin, 2020).

En efecto, un instrumento que puede convertirse en elemento primordial para disminuir los efectos del cambio climático es la transición energética. Este conjunto de políticas permite al sistema productivo alejarse de los combustibles fósiles integrando una serie de fuentes energéticas alternativas en el conjunto de energías

disponibles para la sociedad. Además, las transiciones energéticas implican procesos de cambios no sólo del régimen tecnológico vigente sino del conjunto de reglas, políticas, interacciones entre actores, transformación del territorio, resistencia y conflicto (Geels, 2002; Delina, 2018), considerándose apropiadamente como una transición sociotécnica.

En el centro de la discusión acerca de la transición se encuentra el sector energético, principalmente el eléctrico. Los reportes muestran que el aumento de las  $\text{ECO}_2$  es el principal contribuyente del cambio climático global, con 70% de estas emisiones vinculadas a consumo excesivo de energía (International Energy Agency [IEA], 2017). En este campo, durante el periodo 1990-2016 el sector eléctrico fue el principal responsable de las emisiones contaminantes.

El interés de la transición energética en el sector eléctrico radica en dos aspectos: el primero es su importancia relativa en las disminuciones de  $\text{ECO}_2$ , permitiendo así cumplir con las metas pactadas y evitar los escenarios catastróficos que plantea el IPCC (2021). En segundo lugar, el tránsito energético exige considerar las consecuencias sociales del nuevo esquema. Por lo cual, el nuevo paradigma en el sector eléctrico debe guiarse por un principio de sustentabilidad y justicia, pues representa un servicio productivo para el resto de los sectores económicos y un servicio vital en los hogares. Como resultado, el acceso a la electricidad por parte de las familias debe ser justo, equitativo e inclusivo, además de ser sostenible en términos ambientales (Carley y Konisky, 2020).

A la luz de las discusiones sobre el presente y futuro del sector eléctrico de México (SEM), el objetivo de este artículo es revisar la evidencia acerca de la transición energética del sector eléctrico en el mundo, con el fin de identificar los factores que garanticen un proceso exitoso en nuestro país.

Eberhard y Godinho (2017) señalan que la literatura sobre el sector eléctrico frecuentemente minimiza las complejidades sociales, políticas y económicas de la electricidad en favor de un enfoque más técnico. Para evitar este sesgo, se recurre a la metodología de Análisis Multinivel propuesta por Geels (2019), que interpreta la transición energética como un proceso de evolución conjunta del

sistema económico, tecnológico y social, organizando el análisis en nichos (nivel micro), regímenes (nivel meso) y paisajes (nivel macro). Es decir, permite integrar factores institucionales, económicos, políticos, sociales y externalidades.

Mediante el análisis multinivel se analiza el tránsito energético de un conjunto de países con distintos niveles de desarrollo económica a fin de construir una muestra significativa. Por medio de esta acción es posible construir una taxonomía del tránsito energético del sector. Con ello se discuten las barreras, el impulso y los incentivos a los cuales se enfrenta el SEM. El trabajo está integrado por cuatro secciones restantes. En la siguiente se presentan los elementos de la transición energética, enseguida se describe la metodología, después se presentan los resultados y por último se concluye con una discusión acerca de las lecciones para el sector eléctrico de México.

### **Elementos de la transición energética**

Gran parte de los trabajos sobre transición energética se concentran en la política de innovación<sup>1</sup> como elemento importante para el tránsito hacia tecnologías ambientales renovables.<sup>2</sup> Sin embargo, desde esta postura es posible perder de vista elementos estratégicos que juegan un papel tan importante como la tecnología. Desde una visión sistemática, la transición energética es un conjunto de cambios en las políticas y estrategias de los actores con el objeto de mejorar la aceptación social y la viabilidad política de

<sup>1</sup> Al respecto, Sun et al. (2021) apuntan que el progreso tecnológico es crucial para la transición a una baja emisión de carbono debido a la mejora de la eficiencia en el uso de insumos ambientales. Al mismo tiempo, Noseleit (2017) argumenta que entender la dinámica de la innovación permitirá analizar las distintas velocidades entre países para adoptar regímenes de transición energética. Para Aldieri et al. (2020) es un tema poco estudiado de manera empírica, perdiendo la oportunidad de entender la difusión del conocimiento, la ubicación geográfica, la derrama entre empresas y otros factores como claves en la transición actual.

<sup>2</sup> Éstas se consideran como equipos de producción, métodos y procedimientos, diseños de productos y mecanismos de entrega de insumos que conservan energía y recursos naturales, minimizan la carga ambiental de las actividades humanas y de protección a la naturaleza (Huenteler et al., 2015).

las innovaciones, al tiempo que se modifican aspectos económicos y estructurales (Geels *et al.*, 2020).

Desde esta postura analítica, el proceso de tránsito involucra relaciones entre la sociedad, hacedores de políticas, empresas y gobierno, cuya finalidad sea garantizar una adecuada gobernanza de la tecnología y de los recursos naturales. De acuerdo con Roberts y Geels (2019), un enfoque sistemático facilita las discusiones acerca del nuevo rumbo energético, permite definir los problemas y encontrar soluciones entre los diversos actores involucrados. Si bien la tecnología y la innovación son causas importantes del cambio endógeno en el sistema energético, esta dinámica se genera en un conjunto de instituciones, reglas y normas particulares. A su vez, los factores institucionales crean condiciones de intercambio propicias.

Durante el proceso, las instituciones y los actores orientan sus esfuerzos en la búsqueda de nuevas tecnologías; por tanto, según Defeuilley (2019), la dinámica de cambio implica fuerzas políticas y sociales (coalición de actores, régimen político, valores y creencias, eco-intereses económicos e industriales) que generan tensiones, ganadores y perdedores.

En efecto, Carley y Konisky (2020) advierten las consecuencias adversas de la transición. Los ganadores son aquellos que se benefician de fuentes de energía más limpias, de la reducción de emisiones reflejadas en un mejor ambiente, y quienes acceden a las oportunidades de empleo e innovación. Por otra parte, los perdedores son quienes absorben los costos de las nuevas tecnologías y no tienen acceso a las oportunidades.

Por consiguiente, la transición energética es un complejo campo de acción, estrategias, interrelaciones y procesos que exigen elementos técnicos, económicos y éticos. Es crucial reconocer las condiciones de vulnerabilidad en las que se encuentran ciertos sectores de la sociedad, los cuales carecen de electricidad y se les margina por el tipo de vivienda, factores socioeconómicos, etnia, sexo, edad, religión y estado de salud (Otto *et al.*, 2017). Una transición energética justa no debe abandonar esta arista.

## Metodología del Análisis Multinivel

Para considerar el proceso de tránsito energético a partir de los elementos descritos, es importante recurrir a una metodología que analice el proceso de dicho factor desde una perspectiva multinivel. El punto de partida es la noción de Nelson y Winter (1977) acerca de un régimen tecnológico que se refiere a las reglas cognitivas que guían las búsquedas individuales y la recolección de firmas para conseguir el desarrollo de innovaciones a lo largo de trayectorias tecnológicas específicas.

Rip y Kemp (1998), y Geels (2002) amplían el concepto al insistir en que los regímenes tecnológicos están integrados en instituciones e infraestructuras que dan forma a la trayectoria tecnológica. Geels (2002) reemplaza el término *tecnológico* por el de *socio-tecnológico* al considerar que ninguna transición es totalmente técnica. Específicamente, Geels (2005) sugiere que el régimen consta de tres dimensiones vinculadas: i) redes de actores y grupos sociales; ii) formales, normativas y reglas cognitivas que guían las actividades de los actores; iii) material y elementos técnicos (Verbong y Geels, 2007).

El Análisis Multinivel se integra de tres espacios de interacción. *El nicho* (escala micro) es el espacio donde surgen las innovaciones (Geels, 2010). En esta dimensión se desarrollan las tecnologías renovables que, en un primer momento, coadyuvan con el régimen tecnológico vigente. La finalidad es que las tecnologías se desarrollen, maduren y posteriormente puedan amplificarse e integrarse al esquema de tecnologías disponibles.<sup>3</sup>

El segundo espacio de interacción es *el régimen* (escala meso). De acuerdo con Robertson (2019), es el lugar donde prevalece el esquema vigente de producción energética. Es decir, este espacio

<sup>3</sup> De acuerdo con Roberts y Geels (2019) la transición a partir del nicho involucra cuatro fases. Fase 1. Surgen innovaciones radicales en pequeños nichos al margen de los regímenes existentes. Fase 2. La innovación se desarrolla en pequeños nichos de mercado que tuvieron acceso a recursos para un mayor desarrollo y especialización, permitiendo el surgimiento de un diseño dominante y la estabilización de reglas. Fase 3. Se caracteriza por una amplia difusión y competencia con el régimen existente. El proceso depende de impulsores internos del nicho, como mejoras de precio, rendimiento de la tecnología, escala y economías de aprendizaje, el desarrollo de tecnologías e infraestructuras complementarias. Fase 4. La cuarta fase se caracteriza por el sistema de sustitución e institucionalización en nuevos regímenes.

incorpora el marco político institucional que comprende las estructuras legales y las normas institucionalizadas de una sociedad, el marco económico tecnológico que incluye el desempeño económico, los niveles tecnológicos y la composición sectorial.

Esta dimensión es fundamental al reafirmar el entorno institucional en la dinámica de transición. Los actores se desenvuelven dentro de un marco de reglas formales (regulaciones institucionales, leyes, sistema legal), informales (aprendizaje de los actores cuando se relacionan con el resto), cognitivas (sistemas de creencias, agendas de problemas, principios rectores hacia la búsqueda de la innovación) y normativas (cumplimiento de las reglas de convivencia).

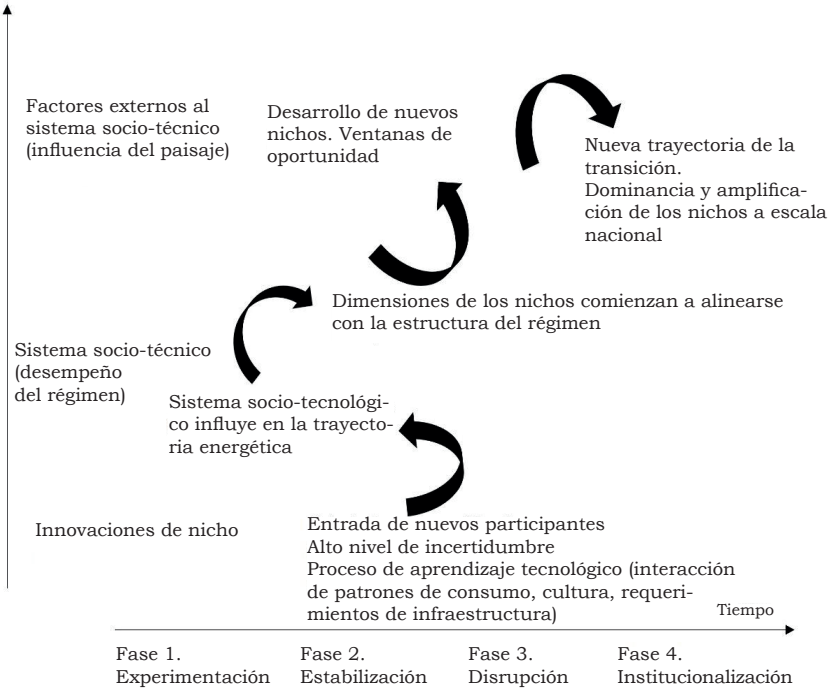
El tercer espacio hace referencia al *paisaje* (escala macro). Los regímenes socio-técnicos se sitúan en un paisaje o entorno determinado que contiene una serie de factores heterogéneos, por ejemplo, variaciones en los precios internacionales de energía, impacto de la política gubernamental, creencias, valores culturales y normativos que ejercen presión sobre el tránsito energético. De este nivel depende la velocidad del proceso de innovación. Estos factores desestabilizan o aceleran el proceso de transición (Robertson, 2019).

La Figura 1 muestra la importancia del tiempo, el régimen y el paisaje en el desarrollo de los nichos. Éste pasa por un proceso de experimentación donde se enfrenta a las preferencias de consumidores, cultura energética, incertidumbre y un nivel de aprendizaje bajo. El régimen permite el desarrollo de los nichos al punto que accede a estabilizarlos (segunda fase). Después, los arreglos institucionales, el aprendizaje y el desarrollo de los nichos posibilita una estabilización hasta que finalmente el nivel de innovación acepta integrarse al esquema energético vigente. Con el tiempo, transforma la trayectoria a escala nacional.

De acuerdo con esta perspectiva, siguiendo a Chapman e Itaoka (2018), los tres niveles en un sistema eléctrico son: i) Elementos materiales y técnicos: recursos, infraestructura de red, activos de generación, inversiones, conocimientos técnicos, entre otros. ii) Actores y redes de grupos sociales: servicios públicos, organismos gubernamentales, usuarios industriales y domésticos. iii) Normas



Figura 1. Perspectiva multinivel del proceso de transición basada en el desarrollo de nichos, paisaje y régimen



Fuente: elaboración propia con base en Geels (2019).

(formales, normativas y cognitivas) que orientan las actividades de los actores dentro del sistema: regulaciones, variaciones de precios, conformación de mercado, principios de funcionamiento, comportamiento, creencias, subsidios y cultura energética.

Siguiendo esta metodología, en el siguiente apartado se realiza un análisis acerca de distintas experiencias de tránsito energético en el sector eléctrico internacional integrado por los siguientes países: Brasil, China, Sudáfrica, Rusia, España, Inglaterra, Alemania, Estados Unidos, Botswana, Kazakhstan y Vietnam, así como la Unión Europea, países nórdicos e integrantes de la Organización

para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Esta muestra integra países con distintos grados de desarrollo económico a fin de tener elementos para construir una taxonomía de trayectoria energética sostenible a la luz de las exigencias del sector eléctrico.

### **Evidencia empírica del tránsito energético mediante el análisis multinivel**

Para conservar la concordancia del modelo multinivel respecto al análisis de nicho (micro), régimen (meso) y paisaje (macro), se decide mostrar los hallazgos empíricos bajo la misma clasificación.

#### *Tránsito energético a nivel de nicho (micro)*

A pesar de la importancia de la transición energética, no se tiene un campo basto de investigación. A este nivel interesan los factores de la política que inciden en la creación, desarrollo e impulso de nichos tecnológicos. Los principales aportes se enfocan en países desarrollados, particularmente en la Unión Europea. Osazuwa-Peters *et al.* (2020) indican que el desarrollo de nichos en 15 países europeos durante los últimos 30 años dependió de la reproducción de conocimientos entre nichos nacientes, principalmente los enfocados en energía eólica e hídrica.

Los principales espacios e innovación se realizaron al margen del gobierno y fueron impulsados por las comunidades y empresas privadas. El proceso de adopción de tecnologías renovables fue relativamente lento debido a la incertidumbre, riesgo y desconfianza percibida por la población. Aldieri *et al.* (2021) atribuye esta lentitud a la falta de economías de escala durante el inicio del proceso y la falta de experiencia.

En la misma región, Noseleit (2018) analiza el impacto de política de innovación a nivel de nicho. Gracias al sistema institucional normado y compartido entre países, la ubicación geográfica y el efecto spillover entre naciones, los nichos de energía renovables

surgieron simultáneamente. Sin embargo, considera que las mayores derramas se generaron en el país de origen. De esta manera, puede explicarse las diferencias en las velocidades.

En el caso de China, Sun *et al.* (2021) describen un proceso de transición lenta, pero de gran intensidad, principalmente en la incompatibilidad del proyecto de crecimiento económico respecto a la cantidad de energía requerida para cubrir la demanda. Sin embargo, es posible identificar la influencia de la innovación extranjera en el desarrollo de nichos. De acuerdo con los autores, la importación de bienes con alto nivel de innovación y desarrollo (I+D) benefició a diversas regiones del país asiático, principalmente en tecnologías de ciclo combinado. El mecanismo identificado fue la derrama de conocimiento de las importaciones, tal como sucede en la mayoría de los sectores industriales chinos (Chang, 2016). En esta situación, la principal barrera que se encontró en las condiciones geográficas para la instalación de plantas fue el régimen de propiedad.

Para los países integrantes de la OCDE, el estudio más interesante es el de Hoppmann (2018). Este autor se centra en los nichos de las energías eólicas y fotovoltaica del sector eléctrico. Identifica que las tecnologías eólicas requieren de un proceso complejo y de alto grado de conocimiento, por lo cual los nichos identificados realizan este trabajo a pequeña escala e intensa mano de obra, reflejo de su alto nivel de I+D en procesos y aprendizaje práctico. Finalmente, para alcanzar determinada proyección, la variable fundamental es el uso de patentes en el ámbito regional. Mientras los países europeos se benefician por su ubicación, naciones como México o Israel no se apropian de esos beneficios.

Estos nichos muestran el alto grado de capacitación para asimilar, transformar y explotar el conocimiento. Mientras, en los nichos vinculados a energía solar, la evidencia muestra que el nivel de conocimiento previo no es determinante, pues su nivel de reproducción es sencillo, convirtiendo la tarea en práctica y rutinaria. La variable más relevante es la inversión fija inicial.

En el proceso de Brasil, el impulso a la generación de energía solar tuvo un impulso en los nichos y en los hogares. De acuerdo

con Bondarik *et al.* (2018), las reformas implementadas en 2012 permitieron la microgeneración de energía en el ámbito residencial como forma autónoma de abastecimiento.

El caso paradigmático en este nivel es lo acontecido en España. En un extraordinario trabajo, Capellán *et al.* (2018) estudian el papel de las cooperativas impulsoras de energías renovables. Este modelo está integrado por familias y organizaciones civiles. Las funciones de la cooperativa son la generación, distribución y comercialización de energía renovable. Frente a la estructura predominante del mercado eléctrico español y con base en los autores, representa una alternativa. En la experiencia, este tipo de organización demuestra la capacidad de integrar una base social sólida, ofreciendo soluciones sociotécnicas innovadoras debido a su gran capacidad de absorber el conocimiento.

Desde la perspectiva alemana, examinada también en el siguiente apartado, la fase de expansión del sistema eléctrico durante el periodo 2012-2017 permitió la integración de empresas comandadas por ciudadanos. En una primera instancia, recibirían una remuneración a precio fijo durante 20 años. Posteriormente, en una etapa de maduración, se convirtieron en los principales inversionistas del sistema eléctrico, representando 42% de la energía renovable del país.

### *Tránsito energético a nivel de régimen (meso)*

En el análisis de transición energética desde una perspectiva de largo alcance, la esfera de mayor interés es la escala meso. Aquí se refiere a las condiciones institucionales y acciones directas del gobierno donde se desenvuelven los actores a nivel micro. Además, incorpora variables como la estructura de mercado, entorno de negocios, esquema fiscal, tributario, localización espacial y ambiente político.

En el caso inglés, una de las variables que impulsó la adopción de tecnologías renovables en el sector eléctrico fue la ubicación geográfica. En efecto, de acuerdo con Esseletzbichler (2012), la derra-

ma de conocimientos en diversos nichos se amplificó gracias a su cercanía geográfica, a el uso de un software y herramientas similares. Además, los nichos de innovación verde se beneficiaron de su localización para generar procesos locales de innovación, formación de redes y facilitar la movilidad del trabajo. Al contar con similares niveles de formación se facilita su inserción en otra empresa.

Otro elemento para el impulso de los nichos verdes son los fuertes incentivos gubernamentales para la creación de la demanda de energía renovable, el incremento de la infraestructura física, la expansión del mercado, atracción de capitales y el cabildeo político. Sobre todo, el autor apunta, que el Reino Unido es el ejemplo de coordinación entre políticas sectoriales, regionales y nacionales.

Refiriéndonos al caso de los países nórdicos, Noailly y Shestalova (2017) señalan a la política de patentamiento como el aspecto más relevante en la adopción de tecnologías renovables. Principalmente destacan los impactos de los flujos del conocimiento dentro del mismo nicho de tecnologías verdes, la influencia del conocimiento en la interacción de nichos similares y la derrama de tecnología externa.

En el análisis, las autoras destacan como crucial la construcción de una trayectoria tecnológica sólida y de largo alcance. Esto permitió que el conjunto de nichos se sumase a la idea de un sector energético descarbonizado. De tal forma, la evidencia muestra que las invenciones patentadas en los nichos verdes fueron 43% más citadas que las patentes de energías sucias. La tendencia justificó el mayor apoyo gubernamental, creando un proceso de retroalimentación.

De acuerdo con Miramadi *et al.* (2019), el caso de los países nórdicos se caracteriza no sólo por la reducción de emisiones contaminantes del sector energético, sino por su impacto en el resto de los sectores. Efectivamente, las patentes solares son citadas principalmente por otras patentes en el campo de los semiconductores, procesos y aparatos térmicos. Respecto a las de viento, así como a las de energía marina e hidroeléctrica, son mencionadas principalmente por otras patentes en el campo de la energía eléctrica, maquinaria, motores, bombas y turbinas, elementos mecánicos y de

transporte; mientras que las de almacenamiento son citadas principalmente por invenciones en maquinaria eléctrica. Finalmente, las de residuos y biomasa encuentran aplicaciones en los campos de los materiales básicos, de química, ingeniería química y tecnología ambiental.

Siguiendo las estimaciones de las autoras, mientras las patentes de las tecnologías eólicas se citan con mayor frecuencia, las relacionadas con la energía eólica tienen un factor más intenso en la derrama en el resto de los sectores. Como resultado, la mayoría de la reserva del conocimiento energético de los países nórdicos pertenece a las fuentes de energías renovables debido al efecto de contagio intersectorial, al compromiso de los actores y al impulso de la política de innovación.

Un aspecto relevante es la negociación que realizó la industria eólica con las comunidades dueñas de las propiedades donde se instala el complejo tecnológico. Doner (2017) describe claramente los detalles de la política seguida por esta nación para integrar al esquema de ganancias a los agricultores y terratenientes.

Al mismo tiempo que existen elementos que impulsan la adopción de tecnologías, también hay barreras. En el caso de Alemania, de acuerdo con Böhringer *et al.* (2020), el proceso de innovación se ha detenido debido a lo reducido del mercado para energía renovable y la falta de digitalización del sistema energético durante los últimos cinco años.

En el caso de la India, Luthra *et al.* (2019) señalan que las barreras a la transición energética son el costo de capital inicial, falta de mecanismos de financiamiento, pérdidas de transmisión y distribución, tecnología ineficiente, ausencia de subvenciones, falta de conciencia de los consumidores sobre tecnologías, mercado insuficiente, falta de capacidad de pago, almacenaje insuficiente, falta de trabajo de I+D, infraestructura nacional y local, escasez de fuentes alternativas y poca experiencia.

Indagando en el caso alemán, las medidas institucionales desempeñaron un gran papel ya que dicha nación participó considerablemente en la producción de energías renovables. La propuesta alemana permitió la descentralización de la producción de electrici-

dad. El plan Energiewende impulsó, en una primera etapa, la función de la energía nuclear. Posteriormente, como apunta Ramalho (2017), la politización positiva advirtió los riesgos de esta fuente de energía. La creación del partido ecologista impulsó la ley de energías renovables en el año 2000, donde se apostó por el abandono de la energía nuclear y permitió la integración de los pequeños nichos a la escala nacional de abasto. La condición fue que la energía generada proviniera de fuentes hidroeléctricas, eólica, solar, geotérmica, gas de vertedero, gas de aguas residuales, gas de mina o de biomasa. Con base en Ramalho (2017), la participación ciudadana requirió del compromiso de los planificadores y tomadores de decisiones locales.

En el caso español, Gómez *et al.* (2020) señalan que el desarrollo del modelo eléctrico tuvo problemas desde la década de 1990, principalmente en la concentración, liberalización, dominancia del capital privado y la absorción de las pequeñas cooperativas por parte de las empresas pertenecientes al oligopolio, provocando una desarticulación entre los operadores de gran escala y las cooperativas identificadas a escala micro.

### *Tránsito energético en el paisaje (macro)*

En la revisión de la literatura se hace una clara distinción entre los países pobres o en vías de desarrollo y las naciones desarrolladas. En el primer grupo un aspecto primordial es el grado de pobreza. Karatayev *et al.* (2016), en el caso de Kazakhstan, apunta al bajo ingreso en la mayor parte de la población como un factor que incide tempranamente en el desarrollo de las capacidades individuales. Este elemento se convierte en límite a la hora de apropiarse del conocimiento y genera incertidumbre entre los habitantes en donde existe el uso de tecnologías renovables.

La resistencia de las comunidades originarias a la implementación y desarrollo de tecnologías renovables es un factor que se debate ampliamente, ya sea para caracterizarla como defensa de la naturaleza o barrera a la innovación. En el caso de México, Cao y

Friego (2021) analizan a la organización de Luz y Fuerza del Pueblo, movimiento social en el estado de Chiapas que se resiste a la llegada de fuentes eólicas debido a la cosmovisión maya de la electricidad, es decir, para ellos la energía es un don de la naturaleza, por lo cual es imposible venderla o comprarla. Sin embargo, los mismos autores reconocen la debilidad de las cooperativas en la generación de alumbrado por su falta de conocimientos técnicos.

Frente a estas restricciones de apropiabilidad del conocimiento por parte de las comunidades, Cloke *et al.* (2017) propone integrar dentro del proceso de transición energética a las sociedades rurales, principalmente en la alfabetización de sistemas energéticos y de técnicas comunitarias de proyectos, al tiempo que se desarrolle una estructura de financiamiento que atienda sus necesidades.

Respecto al conjunto de países desarrollados, las barreras y exigencias de la política de tránsito energético se enfrenta a las denominadas externalidades, principalmente a las variaciones de precios en dicho sector. Siguiendo a Popp (2019), en Estados Unidos el aumento en los precios del petróleo genera un ascenso de las inversiones en renovables. Otro factor a considerar es la desvinculación que hay entre la economía del carbono de la que genera electricidad.

Normalmente el desmantelamiento y la disminución del carbono crea pérdidas de trabajos, de inversión y de ingresos tributarios, razón por la cual se recomienda que los distintos paradigmas energéticos coexistan para que se forme un proceso de tránsito ciertamente armónico para el trabajador (Dávila y Valdés, 2021). Estos factores han incidido en el caso estadounidense. De acuerdo con Carley y Konisky (2020), la descarbonización ha provocado caídas en ingresos fiscales, mientras que, en términos de empleo, se perderían aproximadamente 160 mil de ellos. En el caso de Rusia, Mitrova y Melnikov (2019) identifican a las fuentes de energías tradicionales como elemento de seguridad energética y estabilidad de ingresos tributarios, razones por las que no hay motivos claros para apostar por tecnologías limpias.

Desde esta misma línea, Shem (2019) señala que la principal barrera para la introducción de nuevas fuentes de energía en Vietnam



es el bajo precio del carbono, que inhibe las inversiones. Una situación similar sucede en Botswana, donde Maswabi *et al.* (2021) consideran que esta nación, al depender de la minería, no permite abordar la preocupación del cambio climático entre la sociedad ni en las prioridades políticas públicas a pesar de los esfuerzos en pequeña escala por electrificar con tecnologías eólicas un número reducido de hospitales y escuelas, que finalmente fracasó por la mala calidad de la infraestructura. De igual forma, Baker y Phillips (2019) argumentaron que, en el caso de Sudáfrica, los principales problemas para la introducción de nuevos actores en materia de energías sustentables son causados por la gran desigualdad y dependencia del carbón.

Un elemento clave para el desarrollo de las tecnologías renovables en el sector, principalmente eólica y solar, es la capacidad de almacenamiento. El actual panorama del sistema eléctrico español se debe, de acuerdo con Gómez *et al.* (2020), a la falta de planificación para almacenar la energía. Las fuentes renovables se enfrentan a la falta de estabilidad, es decir, la energía solar se genera en el día y no en la noche, la inadecuada estructura que permita el acopio y gestión de la energía provoca que los precios se disparen durante las horas de mayor demanda. Como se mencionó con anterioridad, la gran liberalización del sector produce un considerable nivel de intermitencia del servicio, aunado a que las empresas privadas carecen de provisión suficiente para hacer frente a las demandas durante la noche, provocando desmesuradas variaciones del precio.

### *Una breve taxonomía de la transición energética*

Para finalizar este apartado, se realiza una taxonomía de los elementos que obstaculizan o impulsan el proceso de adopción de energías renovables en el sector eléctrico internacional con base en la metodología multinivel. Esta aproximación permite identificar los aspectos clave para la transición correspondiente a cada categoría.

Cuadro 1. Principales impulsos y barreras a la transición energética en el sector eléctrico internacional desde una perspectiva multinivel

<b>Escala</b>	<b>Nicho (micro)</b>
Impulsos	Conocimiento formal
	Economías de escala
	Derramas de conocimiento local y extranjeras
	Derramas de la inversión extranjera
	Cercanía geográfica
	Cooperativas y participación ciudadana
Barreras	Integración de los hogares en el autoabastecimiento
	Mala educación
	Incertidumbre
	Falta de coordinación entre nichos
	Desconfianza de la población
Falta de experiencia	
<b>Escala</b>	<b>Régimen (meso)</b>
Impulsos	Coordinación políticas regionales, locales y nacionales
	Entorno de negocios
	Incentivos a la demanda doméstica de energía eléctrica renovable
	Expansión de mercado
	Cabildeo político
	Acceso a patentes previas
	Interacción de las patentes energéticas con otros sectores
	Incentivos fiscales
	Certidumbre a los inversionistas
Integración al esquema de ganancias de pequeños productores	
Barreras	Exclusión de terratenientes en el esquema de ganancias de eólicas
	Costo de capital inicial
	Mecanismos de financiamiento
	Falta de educación ambiental
	Inestabilidad de fuentes de energías renovables
	Deficiente infraestructura pública y gasto en I+D
Falta de seguimiento de los proyectos	
<b>Escala</b>	<b>Paisaje (macro)</b>
Impulsos	Variaciones de precios de las fuentes fósiles de energía
	Caída en los precios de la tecnología renovable
	Nivel de ingresos
	Altas reservas de fuentes energéticas renovables
Barreras	Condiciones climáticas favorables
	Pobreza
	Falta de conocimientos técnicos
	Resistencia comunitaria
	Cosmovisión de los recursos naturales
	Carencia de alfabetización tecnológica
	Pérdida de empleos e ingresos durante la descarbonización
	Falta de almacenamiento de la energía solar
Dependencia de la economía a insumos fósiles	
Dependencia fiscal de los ingresos provenientes del carbón	

Fuente: Elaboración propia

## **Discusión: actualidad, lecciones y retos para el tránsito energético del SEM**

Los esfuerzos por consolidar una estrategia disruptiva del SEM hacia una trayectoria de sustentabilidad se afianzaron a partir de los compromisos contraídos por México con la firma del Acuerdo de París en 2015. El gobierno estableció una serie de mecanismos para lograr sus objetivos de generar 35% del total de electricidad a partir de fuentes limpias<sup>4</sup> para 2025 y 50% para 2050, mejorar el bienestar social y dar forma a un futuro sostenible (Pérez-Denicia *et al.*, 2017).

Para impulsar estos objetivos fue necesaria la creación de ciertos estatutos que garantizaran el impulso en el sector. Entre los más destacados se encuentran la creación del Sistema de Generación Limpia Distribuida, que busca afianzar la energía solar y de biogás, así como de la Ley de Transición Energética decretada en 2015, la cual estableció los puntos de referencia para el adecuado aprovechamiento de energías limpias.

La urgencia por disminuir los GEI es alta debido a que para 2017 el 70% de este tipo de emisiones correspondió al sector energético (Lüpke y Well, 2020). El nuevo modelo de transición del SEM no sólo busca promover la producción y consumo de energía más limpia y de menor costo, sino también la modificación del papel del consumidor pasivo de energía hacia un consumidor responsable y conecedor del ahorro, la eficiencia y el uso de energías limpias.

Dentro de los estatutos se planteó la creación del Sistema de Generación Limpia Distribuida en México, a partir de dos fuentes de energía: solar y de biogás. Además, se constituyó el Programa Especial de la Transición Energética, el cual establece que transitar

<sup>4</sup> En 2014, la Ley de la Industria Eléctrica menciona que por energías renovables se refiere a las de viento, radiación solar, oceánica (maremotriz, maremotérmica, corrientes marinas y gradiente de concentración de sal), el calor de los yacimientos geotérmicos y bioenergéticos, el poder calorífico del metano y residuos en granjas pecuarias, la generada por el aprovechamiento del hidrógeno, centrales hidroeléctricas, nucleoelectrica, de cogeneración, las producidas por ingenios azucareros, la derivada de residuos sólidos urbanos y la originada por centrales térmicas en procesos de captura de bióxido de carbono, entre otras que determinen la Secretaría de Energía y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

a energías renovables representaría un ahorro en el consumo final de 40% en los próximos 35 años, mientras que en el sector residencial podría alcanzar hasta 53.4%. Aunado a esto, el Fondo Mexicano para la Transición Energética se ha utilizado principalmente para la electrificación con tecnología fotovoltaica en algunas áreas de México (Pérez-Denicia *et al.*, 2017). Los resultados todavía parecen estar lejos de los objetivos planteados.

Para 2017, con base en datos del Sistema de Información Energética (SIE) de la Secretaría de Energía (Sener), la producción nacional fue liderada por las centrales públicas con 51.98%, mientras que las de productores independientes de energía (PIE) representaron 26.72% y las centrales eléctricas de autogeneración 20.10%. En cuanto a la fuente de consumo energético principal de cada central, las plantas públicas han migrado gradualmente del combustible (19.47% para 2017) al gas natural (35.80%), mientras el carbón mantiene su tendencia histórica (20.71%), al tiempo que los PIE producen electricidad casi en su totalidad con gas natural<sup>5</sup> (98.24% para 2017) y las centrales de autogeneración son lideradas principalmente por este gas (75.22% en 2017).

En cuanto a la participación de tecnologías en la producción de electricidad general, el Cuadro 2 muestra un balance de la capacidad instalada y la generación bruta entre 2002, primer año de impacto representativo de energías renovables, y 2017. En general, el papel de las termoeléctricas ha incrementado su participación a cerca del 70% de la generación nacional. Dentro de este rubro, la tecnología de ciclo combinado en ese año figuró con 72.22%, seguido de la de vapor con 23.37%. Referente a las tecnologías renovables consideradas por la Ley de la Industria Eléctrica, es decir, hidroeléctrica, nucleoeléctricas, eólicas, fotovoltaica y cogeneración, representaron 26.8% de la generación bruta en 2002, mientras que en 2017 disminuyó a 18.97 por ciento.

En el caso de México, la estructura del SEM sigue privilegiando el uso de energías convencionales, mientras que las tecnologías reno-

<sup>5</sup> A pesar de que las energías eólicas no son significativas en la producción eléctrica en este tipo de central, el SIE reporta que para 2016, el 87.6% de la capacidad instalada en este rubro corresponde a los PIE, mientras el 12.3% restante pertenece a la Comisión Federal de Electricidad.

Cuadro 2. Participación de las tecnologías de generación eléctrica en México entre 2002 y 2007

<i>Descripción</i>			<b>2002</b>		<b>2017</b>	
<i>Tipo de central</i>	<i>Insumo energético primario</i>	<i>Descripción del proceso</i>	a*	b	a*	b
Termoeléctricas	Combustible / gas natural	Conversión poder calórico del combustible en energía térmica.	59,32	65,04	52,82	69,07
<b>Turbogás*</b>	Gas natural	Compresión en turbina de gases de combustión a elevadas temperaturas	6,66/ 11,23	3,19/ 4,91	6,19/ 11,71	2,33/ 3,37
<b>Vapor*</b>	Gas natural	Utilización de emisiones de otros procesos químicos	35,18 / 59,30	39,58 / 60,85	26,53 / 50,23	16,14 / 23,37
<b>Ciclo combinado*</b>	Gas natural y vapor de agua	Combinación de unidades de turbogás y vapor aprovechando residuos para generar vapor de agua.	17,13 / 28,87	21,99 / 33,82	19,26 / 36,47	49,88 / 72,22
<b>Combustión interna*</b>	Diesel	Principios de motores de combustión interna para generar	0,35/ 0,60	0,27/ 0,43	0,84/ 1,59	0,72/ 1,07
Hidroeléctrica	Energía potencial de las masas de agua y lagos	Convierte energía potencial en mecánica a través de turbinas o ruedas hidroeléctricas	23,67	12,41	28,47	11,68
Carboeléctricas	Combustible o, gas natural o carbón	Conversión del poder calórico del combustible en energía térmica.	6,40	8,06	12,65	11,94
Nucleoeléctricas	Energía nuclear	Conversión energía calorífica en mecánica	3,36	4,86	3,78	4,22
Geotérmica	Proveniente del núcleo de la tierra	Extracción del vapor del suelo para convertirlo en energía mecánica	2,07	2,69	2,05	2,30
Eólica	Viento	Conversión de la energía del viento mediante aeroturbina	0,005	0,003	0,20	0,77
Fotovoltaico	Radiación solar	Conducción de la energía solar a través de semiconductores	0	0	0,014	0,004
Cogeneración	Energía calorífica	Utilización de calor de actividades industriales	5,17	6,93	0	0
<b>Total</b>			<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Fuente: Elaboración propia con base en Valdés (1999) y con datos del SIE (2021)						
a: Capacidad instalada						
b: Generación bruta						
*En el caso de turbogás, vapor, ciclo combinado y combustión interna, los primeros valores corresponde al porcentaje respecto al total nacional, mientras el segundo hace referencia al porcentaje respecto al total de termoeléctricas. Se hace esta distinción porque son procesos independientes, pero están contenidos en el conjunto de termoeléctricas.						

vables han perdido impulso tanto en capacidad instalada y generación bruta. Particularmente, las tecnologías renovables no se han consolidado como nichos de transformación del régimen basado en gas natural, carbón y combustible. A pesar de la participación de los PIE y autogeneradores, es prematuro hablar del impulso a energías

renovables. Además, la configuración institucional (el paisaje desde una perspectiva multinivel) no ha permitido la maduración de nichos de desarrollo, incluso por las ventajas geográficas propicias del norte del país para la implementación de energía solar. Siguiendo a Pérez-Denicia et al. (2017), el país cuenta con un potencial enorme no aprovechado en el desarrollo de energía geotérmica, biomasa, hidroeléctrica y eólica. Incluso en la implementación de esta última se han presentado una serie de tensiones.

Por ejemplo, Mejía-Montero et al. (2020) señalan que en 2019 existían 24 parques eólicos en el Istmo en un área de aproximadamente 25, mil hectáreas. Sin embargo, durante la gestión de estos proyectos la población también se quejó de la falta de responsabilidad del gobierno local, y de la junta ejecutiva de tierras comunales, que otorgó permisos para construir el proyecto sin informar adecuadamente a la población.

## **Conclusiones**

La crisis energética y ambiental exige de esfuerzos extraordinarios para el desarrollo de alternativas que mitiguen los efectos del cambio climático. El sector eléctrico, en el proceso de la transición energética, será el responsable de garantizar un acceso justo y equitativo a la sociedad, logrando que la generación de electricidad reduzca su impacto ecológico reflejado en el nivel de gases de efecto invernadero.

El análisis presentado demuestra la pertinencia de contar con una metodología multinivel para el análisis de la transición energética a fin de capturar el mayor número de elementos que permitan explicar la evolución del sistema energético, social, tecnológico, institucional y ambiental. Gracias a este enfoque, es posible detallar a partir del nicho, paisaje y régimen los retos que han afrontado distintas naciones del mundo en la conversión hacia una sustentabilidad del sector eléctrico.

Del recorrido se desprenden lecciones relevantes para el caso de México, que a la luz del debate se podría acercar a la configuración

futura del sector. El SEM debe avanzar en una agenda inevitable para los sistemas energéticos del mundo, tomando en cuenta que el camino es de largo alcance y donde será relevante mediar las disputas entre ganadores y perdedores de la transición.

Se recomienda el impulso de nichos de innovación a partir de arreglos institucionales que integren a las comunidades rurales al esquema de ganancias, tal como en el caso alemán, así como modificar conjuntamente la estructura de mercado para permitir la participación de pequeñas cooperativas en el sistema eléctrico nacional, como el caso español. Otro aspecto serán las medidas de compensación en el proceso de descarbonización del esquema actual para evitar tensiones y resistencias. Simultáneamente, la geografía y el clima del país puede aprovecharse para contar con fuentes alternas de abastecimiento que se conjuguen con una fuente de mayor estabilidad. En este punto, se requerirá la participación de la rectoría estatal para evitar la colusión de actores privados que pongan en riesgo la estabilidad del sector tal como se explicó en el caso español.

Entre otras medidas, sin intentar agotar la amplia gama de posibilidades y acciones, es importante la capacitación técnica de las organizaciones autónomas de producción eléctrica, mejorar el esquema de transmisión energética, reconocer los beneficios de la innovación y la I+D en el campo de las eólicas y solares debido a su nivel de articulación en el ámbito de las patentes con el resto de los sectores, así como el papel activo de la Sener y otras dependencias gubernamentales en la vigilancia de los acuerdos entre los actores.

Si bien, tal como señalan Fouquet y Pearson (2012), una transición completa se realiza cuando la cuota de mercado a las nuevas tecnologías es del 5 al 80%, además de requerir de 30 a 50 años, México aún está a tiempo de comenzar una transición en el SEM a fin de cumplir con las exigencias ciudadanas y planetarias.



## Bibliografía

- Aldieri, L., Grafström, J. y Vinci, C. (2021). “The Effect of Marshallian and Jacobian Knowledge Spillovers on Jobs in the Solar, Wind and Energy Efficiency Sector”. *Energies*, vol. 14, núm. 14, 4269.
- Aldieri, L., Makkonen, T. y Vinci, C. (2020). “Environmental knowledge spillovers and productivity: A patent analysis for large international firms in the energy, water and land resources fields”. *Resources Policy*, núm. 69, 101877.
- Baker, L. y Phillips, J. (2019). “Tensions in the transition: The politics of electricity distribution in South Africa”. *Environment and Planning Politics and Space*, vol.37, núm. 1, pp. 177-196.
- Böhringer, C., Cantner, U., Costard, J., Kramkowski, L. V., Gatzert, C. y Pietsch, S. (2020). “Innovation for the German energy transition-Insights from an expert survey”. *Energy Policy*, núm. 144, 111611.
- Bondarik, R., Pilatti, L. y Horst, D. (2018). “Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil”. *Inter-ciencia*, vol. 43, núm.10, pp. 680-688.
- Cao, U., y Frigo, G. (2021). “Of social movements, human rights and electricity access: Exploring an indigenous civil resistance in Chiapas, Mexico”. *Energy Research y Social Science*, núm. 75, 102015.
- Capellán-Pérez, I., Campos-Celador, A. y Terés-Zubiaga, J., “Renewable Energy Cooperatives as an Instrument towards the Energy Transition in Spain”. *Energy Policy*, núm. 123, pp. 215-29.
- Carley, S., Konisky, D. (2020). “The justice and equity implications of the clean energy transition”. *Nature Energy*, vol. 5, núm. 8, pp. 569-577.
- Chen, Y. y Lin, B. (2020)., “Slow diffusion of renewable energy technologies in China: An empirical analysis from the perspective of innovation system”. *Journal of Cleaner Production*, núm. 261,121186.
- Cloke, J., Mohr, A. y Brown, E. (2017). “Imagining renewable energy: Towards a Social Energy Systems approach to community



- renewable energy projects in the Global South”. *Energy research y social science*, vol. 31, pp. 263-272.
- Cuenca, J., Jamil, E. y Hayes, B. (2020). “Energy communities and sharing economy concepts in the electricity sector: A survey”. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, pp. 16.
- Dávila, A. y Valdés, M. (2021). *Del carbón a las renovables: Análisis económico para la transición eléctrica en México*. Centro de Investigaciones Socioeconómicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y WWF México.
- Defeuilley, C. (2019). “Energy transition and the future (s) of the electricity sector”. *Utilities Policy*, núm. 57, pp. 97-105.
- Delina, L. (2018). *Accelerating Sustainable Energy Transition (s) in Developing Countries: The challenges of climate change and sustainable development*. Routledge.
- Doner, J. (2017). *Barriers to adoption of renewable energy technology*. Institute for Regulatory Policy Studies Working Paper. Institute for Regulatory Policy Studies, Illinois State University.
- Dosi, G. (1982). “Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change”. *Research policy*, vol. 11, núm. 3, pp. 147-162.
- Eberhard, A. y Catrina Godinho, C. (2017). *A review and exploration of the status, context and political economy of power sector reforms in Sub-Saharan Africa, South Asia and Latin America*. EEG State-of-Knowledge Paper Series.
- Essletzbichler, J. (2012). “Renewable energy technology and path creation: A multi-scalar approach to energy transition in the UK”. *European Planning Studies*, vol. 20, núm. 5, pp. 791-816.
- Fouquet, R. y Pearson, P. (2012). “Past and prospective energy transitions: Insights from history”. *Energy Policy*, vol. 50.
- Freeman, C. y Perez, C. (1988). “Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. Technology, Organizations, and Innovation: Theories, concepts and paradigms”, pp. 38-66.

- Geels, F. (2002). "Understanding the dynamics of technological transitions. A co-evolutionary and socio-technical analysis".
- Geels, F. (2004). "From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory". *Research policy*, vol. 33, núm. 6-7, pp. 897-920.
- Geels, F. (2005). *Technological transitions and system innovations: a co-evolutionary and socio-technical analysis*. Londres, Edward Elgar Publishing.
- Geels, F. (2019). "Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective". *Environmental Sustainability*, núm. 39, pp.187-201.
- Geels, F. McMeekin, A. y Pfluger, B. (2020). "Socio-technical scenarios as a methodological tool to explore social and political feasibility in low-carbon transitions: Bridging computer models and the multi-level perspective in UK electricity generation (2010–2050)". *Technological Forecasting and Social Change*, núm. 151, 119258.
- Gómez, T., Linares, P. y Rodilla, P. (2020). "Propuestas para la reforma del sector eléctrico en España". *Papeles de Economía Española*, núm. 163, pp. 24-203.
- Hoppmann, J. (2018). "The role of interfirm knowledge spillovers for innovation in mass-produced environmental technologies: evidence from the solar photovoltaic industry". *Organization y Environment*, vol. 31, núm. 1, pp. 3-24.
- International panel on climate change (2021). *The Physical Science Basis*.
- Kallis, G. y Norgaard, R. B. (2010). "Coevolutionary ecological economics". *Ecological economics*, vol. 69, núm. 4, pp. 690-699.
- Karatayev, M., Hall, S., Kalyuzhnova, Y. y Clarke, M. (2016). "Renewable energy technology uptake in Kazakhstan: Policy drivers and barriers in a transitional economy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 66, pp. 120-136.
- Kebede, K. y Mitsufuji, T. (2017). "Technological innovation system building for diffusion of renewable energy technology: A case

- of solar pv systems in Ethiopia”. *Technological Forecasting and Social Change*, núm. 114, pp. 242-253.
- Kemp, R. (1994). “Technology and the transition to environmental sustainability: the problem of technological regime shifts”. *Futures*, vol. 26, núm.10, pp. 1023-1046.
- Krumm, A., Süsser, D. y Blechinger, P. (2021). “Modelling social aspects of the energy transition: What is the current representation of social factors in energy models?”. *Energy*, 121706.
- Luthra, S., Kumar, S., Garg, D. y Haleem, A. (2015). “Barriers to renewable/sustainable energy technologies adoption: Indian perspective”. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, pp. 762-776.
- Maswabi, M., Chun, J. y Chung, S. (2021). “Barriers to energy transition: A case of Botswana”. *Energy Policy*, núm. 158, 112514.
- Mejía-Montero, A., Alonso-Serna, L. y Altamirano-Allende, C. (2020). “The role of social resistance in shaping energy transition policy in Mexico: The case of wind power in Oaxaca”. *The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions*, pp. 303-318.
- Mejía-Montero, A., Alonso-Serna, L. y Altamirano-Allende, C. (2020). “The role of social resistance in shaping energy transition policy in Mexico: The case of wind power in Oaxaca”. *Utilities Policy*, 5797,105.
- Miremadi, I., Saboohi, Y. y Arasti, M. (2019). “The influence of public RyD and knowledge spillovers on the development of renewable energy sources: The case of the Nordic countries”. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, pp. 450-463.
- Mitrova, T. y Melnikov, Y. (2019). “Energy transition in Russia”. *Energy Transitions*, vol. 3, núm. 1, pp. 73-80.
- Nelson, R. (2001). “A viewpoint on evolutionary economic theory”. *Evolutionary Controversies in Economics*, pp. 15-22.
- Nelson, R. (ed.) (1993). *National innovation systems: A comparative analysis*. Oxford University Press.
- Noailly, J. y Shestalova, V. (2017). “Knowledge spillovers from renewable energy technologies: Lessons from patent citations”.

- Environmental Innovation and Societal Transitions, núm. 22, pp. 1-14.
- Noseleit, F. (2018). “Renewable energy innovations and sustainability transition: How relevant are spatial spillovers?”. *Journal of Regional Science*, vol. 58, núm. 1, pp. 259-275.
- Osazuwa-Peters, M., Hurlbert, M., McNutt, K., Rayner, J. y Gattessa, S. (2020). “Risk and socio-technical electricity pathways: A systematic review of 20 years of literature”. *Energy Research y Social Science*, 101841.
- Otto, I., Reckien, D., Reyer, C., Marcus, R., Le Masson, V., Jones y Serdeczny, O. (2017). “Social vulnerability to climate change: A review of concepts and evidence”. *Regional environmental change*, vol. 17, núm. 6.
- Pérez-Denicia, E., Fernández-Luqueño, F., Vilariño-Ayala, D., Montaña-Zetina, L. y Maldonado-López, L. A. (2017). “Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 78, pp. 597-613.
- Popp, D. (2019). “Promoting Innovation for Low-Carbon Technologies”. *Policy Proposal*, núm. 14.
- Przychodzen, W. y Przychodzen, J. (2020). “Determinants of renewable energy production in transition economies: A panel data approach”. *Energy*, núm. 191, 116583.
- Ramalho, M. (2017). *The role of Public Policy and Regulation in the transformation of the Electricity Sector: The case of the Germany Energy Transition*. Tesis doctoral, Universidad Federal de Río de Janeiro.
- Rip, A. y Kemp, R. (1998). “Technological change. Human choice and climate change”, vol. 2, núm. 2, pp. 327-399.
- Roberts, C. y Geels, F. (2019). “Conditions and intervention strategies for the deliberate acceleration of socio-technical transitions: lessons from a comparative multi-level analysis of two historical case studies in Dutch and Danish heating”. *Technology Analysis y Strategic Management*, vol. 31, núm. 9, pp. 1081-1103.

- Robertson, F. (2019). “The geography of socio-technical transitions: Transition– periphery dynamics”. *The Geographical Journal*, núm. 185, pp. 447-458.
- Schot, J. y Geels, F. (2007). “Niches in evolutionary theories of technical change”. *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 17, núm. 5, pp. 605-622.
- Sun, H., Edziah, B., Kporsu, A. Sarkodie, S. y Taghizadeh-Hesary, F. (2021). “Energy efficiency: The role of technological innovation and knowledge spillover”. *Technological Forecasting and Social Change*, núm. 167, 120659.
- Verbong, G. y Geels, F. (2007). “The ongoing energy transition: lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004)”. *Energy policy*, vol. 35, núm. 2, pp. 1025-1037.
- Von Lüpke, H. y Well, M. (2020). “Analyzing climate and energy policy integration: the case of the Mexican energy transition”. *Climate Policy*, vol. 20, núm. 7, pp. 832-845.
- Winter, S. y Nelson, R. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge Press.